Rapport technique canadien sur
l'hydrographie et les sciences océaniques 270

2011

VALIDATION DES IMAGES COMPOSITES DES TEMPÉRATURES DE SURFACE PRODUITES AU LABORATOIRE DE TÉLÉDÉTECTION DE L'INSTITUT MAURICE-LAMONTAGNE

par

B. Pettigrew, P. Larouche et D. Gilbert

Direction régionale des sciences
Ministère des Pêches et des Océans
Institut Maurice-Lamontagne
850 route de la Mer, C.P. 1000
Mont-Joli (Québec)
Canada, G5H 3Z4

© Sa Majesté la Reine du Chef du Canada, 2011.
No de cat. Fs 97-18/0000F-PDF ISSN 1488-5484

Publié par

Pêches et Océans Canada
200, rue Kent
Ottawa (Ontario) K1A 0E6

Avec l'aide et la collaboration du Conseil des bibliothèques de Pêches et Océans (CBPO)

On devra citer la publication comme suit:

Pettigrew, B., Larouche, P. et Gilbert D. 2011. Validation des images composites des températures de surface produites au laboratoire de télédétection de l'Institut Maurice-Lamontagne. Rapp. tech. can. hydrogr. sci. océan. 270 : viii + 31 p.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX iv

LISTE DES FIGURES vi

RÉSUMÉ vii

ABSTRACT vii

1. INTRODUCTION 1

2. MÉTHODOLOGIE 2

2.1 DONNÉES SATELLITAIRES 2
2.2 FILTRE CLIMATOLOGIQUE 3
2.3 DONNÉES *IN SITU* 4

3. RÉSULTATS 5

3.1 COMPARAISONS INSTANTANÉES 6
3.2 COMPARAISONS JOURNALIÈRES 10
3.3 COMPARAISONS HEBDOMADAIRES 11
3.4 COMPARAISONS BIMENSUELLES 12
3.5 LA QUALITÉ DES DONNÉES EN FONCTION DU NOMBRE DE PIXELS 14

4. DISCUSSION 16

4.1 BIAIS DE TEMPÉRATURE 16
4.2 ANALYSE SPECTRALE 17
4.3 EFFETS DE LA PÉRIODE P DES COMPOSITES SUR LES RÉSULTATS 19
4.4 ERREUR ABSOLUE 20

5. CONCLUSIONS 21

6. REMERCIEMENTS 22

7. RÉFÉRENCES 22

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Stations de validation du réseau de thermographes. Le nom de la station est suivi de la date de début de monitorage, de la position, la hauteur de la colonne d'eau, la profondeur du thermographe et l'intervalle d'échantillonnage 5

Tableau 2a. Statistiques des différences instantanées SST_U - SST_Z. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N.... 6

Tableau 2b. Statistiques des différences instantanées SST_F - SST_Z. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N 7

Tableau 2c. Statistiques des différences instantanées SST_F - SST_Z pour les passes de jour. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N 8

Tableau 2d. Statistiques des différences instantanées SST_F - SST_Z pour les passes de nuit. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N 8

Tableau 3. Résumé des études comparatives. Les acronymes BF, BD et IE signifient respectivement bouée fixe, bouée dérivante et instrument embarqué sur des navires. Le nombre d'observations est indiqué dans la colonne étiquetée par la lettre N 9

Tableau 4a. Statistiques des différences journalières $<SST_U>$ - $< SST_Z >$ basées sur les valeurs moyennes. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N 10

Tableau 4b. Statistiques des différences journalières $<SST_F>$ - $<SST_Z>$ basées sur les valeurs moyennes. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N 10

Tableau 4c. Statistiques des différences journalières $<SST_F>$ - $<SST_Z>$ basées sur les valeurs médianes. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N 11

Tableau 5a. Statistiques des différences hebdomadaires $<SST_U>$ - $<SST_Z>$ basées sur les valeurs moyennes. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N 11

Tableau 5b. Statistiques des différences hebdomadaires $<SST_F>$ - $<SST_Z>$ basées sur les valeurs moyennes. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N 12

Tableau 5c. Statistiques des différences hebdomadaires $<SST_F>$ - $<SST_Z>$ basées sur les valeurs médianes. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N 12

Tableau 6a. Statistiques des différences bimensuelles $<SST_U>$ - $<SST_Z>$ basées sur les valeurs moyennes. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N 13

Tableau 6b. Statistiques des différences bimensuelles $<SST_F>$ - $<SST_Z>$ basées sur les valeurs moyennes. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N 13

Tableau 6c. Statistiques des différences bimensuelles $<SST_F>$ - $<SST_Z>$ basées sur les valeurs médianes. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N 13

Tableau 7a. Coefficients des régressions non-linéaires des erreurs absolues journalières suivis du coefficient de détermination 15

Tableau 7b. Coefficients des régressions non-linéaires des erreurs absolues hebdomadaires suivis du coefficient de détermination.....15

Tableau 8. Test de normalité Kolmogorov-Smirnov appliqué aux données des statistiques se retrouvant aux tableaux 4b, 5b et 6b. La valeur 0 indique que l'hypothèse nulle, H_0, ne peut être rejetée au niveau de confiance de 5% tandis que la valeur 1 indique que H_0 peut être rejetée au niveau de confiance de 5%. 19

LISTE DES FIGURES

Figure 1. La position des six stations de validation est indiquée par les cercles pleins tandis que les cercles vides indiquent la position des autres stations de monitorage du réseau de thermographes. L'isobathe de 200 m est tracée.....25

Figure 2. Cycle journalier moyen des températures *in situ*. Les heures locales des stations du Banc Beaugé, de l'Irving Whale et de La Perle sont représentées dans le fuseau horaire HAA (= UTC - 3h) tandis que celles des stations de Rimouski, du Havre-Saint-Pierre et du Mont-Louis sont dans le fuseau horaire HAE (= UTC - 4h).....26

Figure 3. Comparaisons de distributions des différences instantanées de la station du Mont-Louis. a) En considérant les données de jour et de nuit, les différences SST_U - SST_Z en rouge sont comparées aux différences SST_F - SST_Z en gris pâle. b) En considérant uniquement les données filtrées, les différences SST_F - SST_Z de nuit en rouge, sont comparées avec celles de jour, en gris pâle.....27

Figure 4. L'erreur absolue des moyennes journalières en fonction de la classe de pixels M. La régression non-linéaire est représentée par la ligne continue tandis que la surface ombragée est l'intervalle de confiance à 95% obtenu par la méthode des percentiles bootstrap (× si $N < 10$; • autrement). R^2 désigne le coefficient de détermination 28

Figure 5. L'erreur absolue des moyennes hebdomadaires en fonction de la classe de pixels M. La régression non-linéaire est représentée par la ligne continue tandis que la surface ombragée est l'intervalle de confiance à 95% obtenu par la méthode des percentiles bootstrap (× si $N < 10$; • autrement). R^2 désigne le coefficient de détermination 29

Figure 6. L'erreur absolue des moyennes bimensuelles en fonction de la classe de pixels M. La régression non-linéaire est représentée par la ligne continue tandis que la surface ombragée est l'intervalle de confiance à 95% obtenu par une distribution de Student (× si limite inférieure IC < 0, $N < 3$, |asymétrie| > 1 ; • autrement). R^2 désigne le coefficient de détermination 30

Figure 7. Représentation de la densité spectrale de puissance préservant la variance, f·Syy $(°C)^2$ / cpj (cycle par jour) en fonction de la fréquence f (cpj). Chaque courbe représente le spectre moyen des températures *in situ* pour les années 2002 - 2004. Aux stations La Perle et du Mont-Louis la ligne rouge représente le spectre moyen (années 2002 - 2003 pour La Perle et 2002 - 2004 pour Mont-Louis) des températures mesurées à 26 m et 30 m de profond respectivement ; ν représente le nombre de degrés de liberté équivalent.....31

RÉSUMÉ

Pettigrew, B., Larouche, P. et Gilbert D. 2011. Validation des images composites des températures de surface produites au laboratoire de télédétection de l'Institut Maurice-Lamontagne. Rapp. tech. can. hydrogr. sci. océan. 270 : viii + 31 p.

Un système opérationnel entièrement automatisé ayant la charge de produire des images composites des températures de surface (SST) des eaux canadiennes a été élaboré au laboratoire de télédétection de l'Institut Maurice-Lamontagne (IML) à partir de données du capteur Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). Des températures de surface de l'eau mesurées *in situ* provenant de six stations réparties dans l'estuaire et le golfe du St-Laurent ont servi à la validation des images composites pour la période allant d'août 1995 à août 2004. Pour l'ensemble des stations nous avons calculé les statistiques des différences entre les moyennes SST et les moyennes de températures *in situ* pour des périodes de 1, 7 et 15 jours et nous avons obtenu respectivement les valeurs moyennes (écarts-types) de -0,26 °C (1,06 °C), -0,21 °C (0,90 °C) et -0,13 °C (0,84 °C). D'autre part, les résultats montrent que la précision des moyennes journalières est fortement corrélée avec le nombre de mesures composant ces moyennes ; toutefois, à la plupart des stations, cette corrélation diminue rapidement pour les moyennes de 7 et 15 jours. Finalement, nous avons estimé, au niveau de confiance à 95%, l'erreur maximale absolue journalière et hebdomadaire à pratiquement toutes les stations.

ABSTRACT

Pettigrew, B., Larouche, P. et Gilbert D. 2011. Validation des images composites des températures de surface produites au laboratoire de télédétection de l'Institut Maurice-Lamontagne. Rapp. tech. can. hydrogr. sci. océan. 270 : viii + 31 p.

An entirely automated operational system having the task to produce composite images of sea surface temperature (SST) of Canadian waters has been set up at the remote sensing laboratory of Maurice Lamontagne Institute (MLI) using data from Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) sensors. *In situ* sea surface temperatures from six stations located in the Estuary and the Gulf of St. Lawrence have been used to validate composite images from August 1995 to August 2004. Differences over all stations between mean SST and mean *in situ* temperature for averaging periods of 1, 7 and 15 days were respectively -0,26 °C (1,06 °C), -0,21 °C (0,90 °C) and -0,13 °C (0,84 °C) where the values in parentheses are the standard deviations. Results showed that the accuracy of the daily mean is highly correlated to the number of measurements used to compute it. However for most validation stations, that correlation decreased rapidly for the 7 and 15 days averages. Finally, we estimated the maximum daily and weekly absolute error at the 95% confidence level for most stations.

1.0 INTRODUCTION

La couche de mélange de surface de la mer est le siège de nombreux processus biologiques, chimiques et physiques importants dont l'étude et la compréhension nécessitent un suivi des températures. La température de l'eau peut ainsi influencer le recrutement chez certaines espèces marines qui passent une partie de leur cycle de vie dans la couche de surface (Ouellet *et al.*, 2007; Koeller *et al.*, 2009). Les modèles de prévisions océaniques et atmosphériques de même que les modèles sur les changements climatiques utilisent les températures de surface de l'eau (SST = Sea Surface Temperature) pour initialiser les calculs ou encore pour en valider les résultats. Les échanges gazeux (par exemple CO_2) entre la mer et l'atmosphère se produisent dans les premiers microns de la surface et dépendent, entre autres, des valeurs SST.

On observe, depuis plusieurs décennies, les SST par l'entremise de différentes techniques et instruments de mesures (Emery et Thomson 2001; Emery *et al.*, 2001). Dans une éventuelle utilisation de ces données, il faut aussi considérer que les SST peuvent varier considérablement en fonction de la technologie utilisée et de la profondeur de la mesure. De plus, la structure thermique verticale de la couche de mélange est sujette à une forte variabilité spatio-temporelle, qui est en grande partie attribuable à la vitesse du vent et à l'insolation. Des effets régionaux comme la marée, le débit d'eau douce et la bathymétrie, contribuent à la complexification du profil vertical de température. Donlon *et al.* (2007) ont élaboré un cadre théorique qui décrit en détail les diverses définitions relatives aux températures de surface. Toutefois, l'ensemble des données acquises par des instruments installés à des quais, sur des bouées fixes ou dérivantes ou encore à bord de navires n'offrent pas une couverture spatio-temporelle suffisante pour des études régionales ou à plus grande échelle. Il faut aussi considérer que ces différentes sources de données provenant de mesures à des profondeurs variées peuvent être difficilement comparables. L'utilisation des données satellitaires (infrarouge) permet de palier à la faible densité spatiale des données de températures *in situ* en procurant une vue synoptique des températures de surface.

Malgré la disponibilité d'un grand nombre d'images des températures de surface des océans, l'information réelle est beaucoup moindre puisque le signal infrarouge émis par la surface de l'eau ne peut traverser une couche nuageuse ni un épais brouillard ce qui réduit grandement le nombre de pixels par image qui sont utilisables. En plus des nuages, qui compromettent la mesure des températures de surface, une passe satellite ne couvre souvent qu'une partie de la zone d'étude, procurant ainsi une information spatialement incomplète. Un compromis couramment utilisé consiste donc à produire des images composites dont chaque pixel est une moyenne calculée sur une certaine période de temps. Bien que ces images ne représentent plus une vue instantanée des températures de surface, elles montrent avec une grande efficacité les grands patrons et gradients de températures. Breaker *et al.* (2010) ont bien résumé la problématique qui consiste à produire une image (composite) ayant la plus grande surface possible sans nuages durant une période de temps assez courte pour conserver en bonne partie la couverture synoptique. Leurs résultats ont ainsi montré que la perte de couverture synoptique, donc de simultanéité, variait inversement avec le gain en clarté, soit une image ayant un minimum de nuages.

Bien que de nombreuses études comparant les valeurs SST avec les températures de surface *in situ* aient été menées (Qiu *et al.* 2009 ; She *et al.* 2007 ; Notarstefano *et al.* 2006 ; Barton 2007 ; Barton et Pearce 2005 ; Yokoyama et Tanba 1991), personne ne s'est encore attardé à estimer la précision des produits composites basés sur des données à pleine résolution spatiale. Le laboratoire de télédétection de l'IML ayant le mandat national de produire des images composites SST des eaux canadiennes, cette validation est donc des plus pertinentes et nécessaires à une meilleure interprétation des produits générés par un système opérationnel entièrement automatisé.

Le but de cette étude est donc de valider la précision des images composites SST calculées à partir des données du Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). À cette fin, nous avons sélectionné la région de l'estuaire et du Golfe du Saint-Laurent (EGSL) comme zone de test. Cette région a été choisie en raison de la large gamme de températures observables, [-1,8 °C, 25 °C], causée par l'important cycle saisonnier et une variété de masses d'eau de surface, de même qu'à la disponibilité des températures de surface *in situ*. Il est important de noter que cette étude ne tente pas de valider des données ayant subi un post-traitement incorporant des données de plusieurs capteurs ou encore des données *in situ* comme l'ont par exemple réalisé Zhang *et al.* (2004), Reynolds *et al.* (2007), Reynolds et Chelton (2010) et Gemmill *et al.* (2007).

2.0 MÉTHODOLOGIE

2.1 DONNÉES SATELLITAIRES

Les données satellitaires que nous avons utilisées dans cette étude proviennent du capteur AVHRR embarqué à bord des satellites en orbite polaire de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), ayant une résolution au nadir (soit le pixel situé à la verticale du satellite) autour de 1 km. Le laboratoire de télédétection de l'IML procède à l'acquisition, au traitement et à l'archivage des images AVHRR depuis 1993. Les archives comprennent des dizaines de milliers d'images des eaux canadiennes dont celles provenant de la région de l'EGSL qui font l'objet de cette étude.

Les images AVHRR sont acquises avec une antenne en mode Right Hand Circular (RHC), bande L de 1,5 m de diamètre du manufacturier Quorum Communications Inc. Une mise à jour pratiquement journalière des paramètres orbitaux des satellites nous assure que l'antenne suit correctement la trajectoire des satellites lors de leurs passages au voisinage de l'antenne. Une fois l'acquisition terminée, l'image brute est transférée à la chaîne de traitement TeraScan 3.2 (le logiciel TeraScan est un produit de SeaSpace Corporation, É. U.), qui dans un premier temps applique un masque nuage afin de détecter et identifier les pixels qui sont contaminés par des nuages ou encore par de la glace.

La correction géométrique des images s'effectue en deux étapes. Une première correction géométrique effectuée à partir des paramètres orbitaux de la passe du satellite est d'abord réalisée afin de pouvoir sélectionner des régions côtières propices à l'utilisation d'amers. Dans

une seconde étape, l'algorithme de géo-correction utilise une technique basée sur la comparaison entre les amers de l'image et le trait de côte sous forme vectorielle provenant d'une base de données comme la Central Intelligence Agency World Database II ou encore de la Digital Chart of the World. L'attitude du satellite et le temps sont alors ajustés de sorte à maximiser la correspondance entre l'image et la base de données qui est utilisée. La précision de la correction dépend de la distance au trait de côte et varie d'une fraction de pixel à 2 ou 3 pixels (environ 2 - 3 km).

L'algorithme Multi-Channel SST (MCSST) élaboré par McClain *et al.* (1985) a été implanté dans le système opérationnel de l'IML pour convertir les températures de brillance des images AVHRR en températures de surface. Rappelons que le capteur AVHRR mesure la température de brillance qui correspond à la température de l'eau dans la couche de surface de 10 - 20 µm et qui est appelée température superficielle[1]. Toutefois, les coefficients de l'algorithme MCSST ont été calculés en utilisant les valeurs de températures provenant, pour la plupart, d'instruments installés sur des bouées à une profondeur variant de 1 à 2 mètres. Ainsi la température de ce capteur ne correspond plus à la température superficielle mais plutôt à ce que l'on désigne en anglais par la « bulk temperature ». La précision du capteur AVHRR évaluée en laboratoire est de l'ordre de 0,12 °C.

Les résultats qui suivent concernent uniquement les passes individuelles de jour et de nuit des satellites NOAA-14 acquises jusqu'en septembre 2001, de NOAA-16 acquises jusqu'en juillet 2004 et de NOAA-17 enregistrées durant la période de référence (1995-08-13 au 2004-08-19). Un problème relié à la numérisation du capteur AVHRR de NOAA-14 (Podesta *et al.*, 2003) nous a fait éliminer, pour ce capteur, tous les pixels dont la température de surface *in situ* était inférieure à 6 °C.

2.2 FILTRE CLIMATOLOGIQUE

Afin d'éliminer certains pixels qui n'auraient pas été détectés et invalidés par le masque nuage, les données sont soumises à un filtre construit autour d'une climatologie du pixel basée sur des périodes de 7 jours. Dans un premier temps, une température moyenne

$$\overline{T_{ij}} = \frac{1}{L}\sum_{k=1}^{L} T_{ijk} \qquad (1)$$

où les indices i = 1,...,I et j = 1,...,J identifient la position de chaque pixel indexé (i, j) d'une image de taille I x J tandis que l'indice k = 1,...,L identifie chacune des périodes de 7 jours disponibles durant la période de référence allant du 1995-08-13 au 2004-08-19, en utilisant seulement les images de jour. Cette moyenne est ensuite utilisée dans l'inégalité suivante afin de filtrer chaque température T_{ij} :

[1] La température superficielle est la traduction de l'expression anglaise « skin temperature ».

$$\overline{T_{ij}} - \min(b*s, c) < T_{ij} < \overline{T_{ij}} + \min(b*s, c) \qquad (2)$$

où s est l'écart-type associé à la température moyenne obtenue à l'équation (1) pour le pixel (i, j) et min(b*s, c) signifie la valeur minimale de ces deux expressions. Des tests empiriques ont montré que des valeurs de b = 2 et c = 4 °C, donnent de bons résultats. Chaque valeur T_{ij} d'une passe individuelle qui se retrouve à l'extérieur de l'intervalle de confiance ci-haut est identifiée comme invalide. Avec ce nouvel ensemble de données filtrées on recalcule une seconde climatologie et on filtre à nouveau les données avec l'équation (2) avec des valeurs de b et de c valant respectivement 3 et 4 °C.

2.3 DONNÉES *IN SITU*

Les données *in situ* des températures de surface de l'eau proviennent d'instruments installés à certaines stations du réseau de thermographes de l'IML (Figure 1) décrit dans Gilbert *et al.* (1997) et Galbraith *et al.* (2010) et qui compte plus de 20 stations de monitorage. Le réseau de thermographes a vu le jour en 1993 avec le mandat d'établir une banque de données des températures côtières de surface de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent. L'utilisation de bouées du trafic maritime comme plate-forme d'accueil des instruments minimise grandement les coûts d'exploitation usuels de mise à l'eau et de récupération, qui sont alors effectués par la Garde côtière canadienne (GCC) dans le cadre des opérations de leur programme de balisage. Depuis 2002 nous avons débuté l'installation, toujours en collaboration avec la GCC, de bouées océanographiques qui sont relativement éloignées de la côte. L'utilisation d'une gaine de protection robuste pouvant abriter jusqu'à deux thermographes permet de mesurer la température de l'eau à proximité des ancrages des bouées et ce, depuis 1997.

La qualité des données *in situ* repose principalement sur un suivi des étalonnages des thermographes qui sont effectués avant leur mise à l'eau et après leur récupération afin d'estimer la dérive des senseurs de température. De plus, lors du traitement des données, les séries temporelles de températures sont visuellement inspectées par une personne familière avec ce type de données. Les séries de données sont ensuite archivées dans un format de données uniforme pour en faciliter l'exploitation.

Le tableau 1 décrit les six stations du réseau de thermographes, qui ont été utilisées comme points de comparaison avec les pixels correspondants des images composites SST. Ces stations sont assez représentatives de grandes sous-régions comprises dans l'estuaire et le golfe du St-Laurent (Ouellet *et al.*, 2003). De plus, ces stations sont relativement éloignées de la côte afin de minimiser la contamination terrestre du pixel associé à chaque station. En effet, le signal infrarouge provenant de pixels qui sont près de la côte est contaminé par le signal infrarouge émis par les surfaces terrestres qui se trouvent à proximité. Par ailleurs, les stations sélectionnées devaient avoir un historique de mesures suffisant pour en calculer des statistiques. À chacune de ces stations toutes les valeurs SST disponibles provenant des passes individuelles de tous les satellites disponibles de jour comme de nuit ont été extraites. Chaque valeur SST est une moyenne faite sur une matrice de taille 3 x 3 pixels où le pixel central correspond à la position de la station du réseau de thermographes. Seulement les matrices SST comptant au moins 2 pixels valides ont été utilisées dans le calcul des moyennes.

Les images satellitaires sont acquises durant toute l'année. Toutefois, il en va autrement des données *in situ* (SST_Z) provenant des instruments de mesure du réseau de thermographes qui sont mouillés, dans la plupart des cas, de mai à octobre seulement, à cause du couvert de glace hivernal. Les moyennes calculées avec les valeurs SST_Z doivent, au minimum, couvrir la période de comparaison à 95 % afin d'exclure ou tout au moins minimiser un biais qui serait causé par une période incomplète comme cela est souvent le cas au début et à la fin des séries temporelles.

Tableau 1. Stations de validation du réseau de thermographes. Le nom de la station est suivi de la date de début de monitorage, de la position, la hauteur de la colonne d'eau, la profondeur du thermographe et l'intervalle d'échantillonnage.

Station	Début	Latitude N	Longitude W	H (m)	Z (m)	Intervalle (min)
Banc Beaugé	1998-05	49° 30,73'	60° 04,32'	97	1,0	30
Havre-Saint-Pierre	1997-06	50° 06,50'	63° 38,50'	120	1,0	30
Irving Whale	1998-05	47° 24,20'	63° 23,53'	67	1,0	30
La Perle	1996-05	47° 19,45'	61° 34,30'	26	1,0	30
Mont-Louis	1994-04	49° 32,59'	65° 46,32'	325	0,5	30
Rimouski	2002-06	48° 40,00'	68° 35,00'	330	0,5	15

Le réseau de thermographes a utilisé différents types d'instruments de mesure qui proviennent de différents manufacturiers. Avec le temps les instruments ont vu leur capacité de stockage augmenter, et leur précision et résolution s'améliorer. Ainsi, parmi l'ensemble des données *in situ* utilisées, plus de 80% ont une précision d'au moins 0,05 °C tandis que les 20 % restants ont une précision qui varie de 0,1 °C à 0,3 °C.

Nous avons calculé le cycle moyen journalier des températures *in situ* utilisées dans ce rapport. Ainsi à la figure 2 nous pouvons visualiser pour chacune de nos stations le cycle diurne moyen en fonction de l'heure locale. On observe un minimum de température entre 07 :00 et 08 :00 sauf à la station du Havre-Saint-Pierre où le minimum de température est atteint vers les 05 :30. Les stations dans le fuseau horaire HAA ont un maximum de température entre 16 :00 et 18 :00 tandis que les stations dans le fuseau horaire HAE ont leur maximum de température entre 14 :00 et 15 :00. Ces valeurs correspondent bien à celles déjà mesurées avec des séries temporelles plus courtes pour les stations Irving Whale et Mont-Louis par Guillot (2001).

3.0 RÉSULTATS

Avant toute chose précisons qu'en ce qui concerne les valeurs SST, les résultats suivants sont basés sur deux ensembles de données brutes que l'on nomme aussi données instantanées. Un premier ensemble qui contient les données brutes non-filtrées et un second ensemble qui contient les données brutes filtrées.

Cette section est séparée en cinq parties. La première partie présente une analyse de la précision des données instantanées utilisées dans ce rapport et de certains problèmes inhérents reliés à la technologie du capteur AVHRR. Les résultats sont aussi comparés avec ceux provenant d'études

antérieures. Les trois parties suivantes concernent les statistiques des différences entre les moyennes <SST> et les moyennes $<SST_Z>$ pour des périodes de 1, 7 et 15 jours. Ces trois parties sont construites de façon similaire et servent principalement à démontrer l'efficacité du filtre climatologique d'une part et expliciter les statistiques des différences à long terme qui découlent de nos trois périodes de moyenne d'autre part. Finalement, la dernière partie est dédiée à la dépendance entre les différences absolues, $|<SST_F> - <SST_Z>|$, et la fréquence d'échantillonnage du pixel.

3.1 COMPARAISONS INSTANTANÉES

Lorsque sont comparées des données de température instantanées du capteur thermique AVHRR avec des températures mesurées *in situ*, des différences significatives apparaissent, causées en grande partie d'une part par le réchauffement diurne, et d'autre part par les nuages, incluant le brouillard, qui n'ont pas été détectés. D'autres facteurs comme le contenu en vapeur d'eau et les aérosols contribuent à refroidir le signal thermique. La comparaison des données instantanées est une bonne façon d'avoir un aperçu de la qualité des données de base qui ont servi à produire les images (pixels) composites présentées dans les sections suivantes. Pour toutes les comparaisons instantanées, un écart maximum de 15 minutes est toléré entre le temps de l'image, qui correspond à l'heure du début d'enregistrement et l'heure d'échantillonnage du thermographe.

Le tableau 2a présente les comparaisons entre les valeurs non-filtrées, SST_U, et les valeurs *in situ*, SST_Z, pour chacune des six stations. La station La Perle présente les moins bons résultats alors que les meilleures données sont celles acquises dans la région de la station du Mont-Louis. On remarque de plus que de fortes valeurs des différences minimums et maximums n'ont pu être éliminées par l'application d'un masque nuage standard.

Tableau 2a. Statistiques des différences instantanées $SST_U - SST_Z$. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N.

Station	N	Minimum °C	Maximum °C	Moyenne °C	Écart-type °C	Asymétrie[2]
Banc Beaugé	734	-15,64	2,99	-0,88	2,54	-3,19
Havre-Saint-Pierre	869	-14,55	7,74	-0,70	2,45	-2,20
Irving Whale	874	-19,23	7,63	-0,82	2,75	-3,72
La Perle	1014	-19,69	6,40	-1,04	3,01	-3,37
Mont-Louis	1217	-15,73	4,46	-0,62	2,20	-3,53
Rimouski	422	-15,32	6,09	-0,64	2,22	-3,07
Total	5130	-19,69	7,74	-0,79	2,57	-3,34

Le tableau 2b montre les différences entre les valeurs filtrées, SST_F, et les valeurs *in situ*, SST_Z. Il est clair que le filtre climatologique appliqué aux images AVHRR a réussi à améliorer de manière significative les résultats puisque l'erreur moyenne est passée de -0,79 °C à -0,19 °C. L'application d'un filtre climatologique a supprimé les plus fortes anomalies de températures à

[2] Nous avons traduit par asymétrie le terme anglais « skewness ».

toutes les stations en éliminant de 8% à 10% des pixels à chaque station sauf à celle du Havre-Saint-Pierre où le filtre a éliminé environ 20% des pixels.

Tableau 2b. Statistiques des différences instantanées SST_F - SST_Z. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N.

Station	N	Minimum °C	Maximum °C	Moyenne °C	Écart-type °C	Asymétrie
Banc Beaugé	670	-7,37	2,99	-0,21	0,88	-1,44
Havre-Saint-Pierre	698	-8,98	5,63	-0,23	1,41	-0,42
Irving Whale	786	-4,80	2,39	-0,13	0,78	-0,85
La Perle	909	-4,63	3,37	-0,23	0,86	-0,58
Mont-Louis	1116	-6,31	3,34	-0,13	0,83	-1,12
Rimouski	390	-5,34	4,76	-0,26	1,08	0,02
Total	4569	-8,98	5,63	-0,19	0,97	-0,72

Durant le jour, lorsque des conditions de faible vent et forte insolation sont favorables au réchauffement diurne, il se forme une thermocline de surface où la température de l'interface eau-atmosphère n'est plus représentative de la température de l'eau mesurée par un thermographe qui est à 1 - 2 mètres de profondeur. Afin d'éviter un biais causé par le réchauffement diurne il est possible d'utiliser uniquement des images de nuit (She *et al.*, 2005) . D'autre part, le masque nuage est plus efficace sur des images de jour que de nuit, puisque de jour un test d'albédo à partir des données du canal 2 (0,725 - 1,00 µm) est possible. La nuit, le canal 3 (3,55 - 3,93 µm) est utilisé pour discriminer les nuages de la surface de l'eau. Toutefois, l'efficacité de ce test est réduite du fait que le canal 3 est reconnu pour être bruyant. Il devient donc pertinent de déterminer l'impact de ces facteurs sur nos résultats, lorsqu'on utilise uniquement des images filtrées de jour ou uniquement des images de nuit. Le tableau 2c montre les statistiques pour les images de jour uniquement alors que les statistiques pour des images filtrées de nuit uniquement sont présentées au tableau 2d. L'effet du réchauffement diurne apparaît clairement puisque le maximum de jour est généralement supérieur au maximum de nuit. On constate aussi que les minimums de nuit sont, sans exception, inférieurs aux minimums de jour, ce qui pourrait s'expliquer par le fait que les tests de détection de nuages sont plus efficaces de jour avec l'utilisation des données d'albédo. Il est aussi possible que le refroidissement nocturne contribue à amplifier la différence entre les minimums de nuit et les minimums de jour.

De façon globale les images de jour surestiment légèrement les valeurs SST_Z (0,11 °C) tandis que les images de nuit sous-estiment nettement les valeurs SST_Z (-0,38 °C). L'utilisation uniquement d'images de nuit conduit donc à un biais plus important et l'utilisation conjointe des images de jour et de nuit (Tableau 2b) est un compromis raisonnable qui réduit à la fois les différences SST_F - SST_Z ainsi que les écarts-types.

Tableau 2c. Statistiques des différences instantanées SST_F - SST_Z pour les passes de jour. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N.

Station	N	Minimum °C	Maximum °C	Moyenne °C	Écart-type °C	Asymétrie
Banc Beaugé	295	-3,03	2,99	0,00	0,68	0,00
Havre-Saint-Pierre	271	-3,51	5,63	0,34	1,22	0,87
Irving Whale	323	-3,15	2,39	0,12	0,66	-0,53
La Perle	359	-4,16	3,32	0,00	0,75	-0,66
Mont-Louis	429	-3,08	3,26	0,10	0,69	-0,19
Rimouski	103	-1,70	3,77	0,26	0,92	1,20
Total	1780	-4,16	5,63	0,11	0,82	0,54

Tableau 2d. Statistiques des différences instantanées SST_F - SST_Z pour les passes de nuit. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N.

Station	N	Minimum °C	Maximum °C	Moyenne °C	Écart-type °C	Asymétrie
Banc Beaugé	375	-7,37	2,79	-0,37	0,98	-1,61
Havre-Saint-Pierre	427	-8,98	3,83	-0,59	1,40	-0,90
Irving Whale	463	-4,80	2,34	-0,31	0,81	-0,92
La Perle	550	-4,63	2,37	-0,38	0,89	-0,47
Mont-Louis	687	-6,31	3,34	-0,27	0,88	-1,30
Rimouski	287	-5,34	4,76	-0,45	1,07	-0,13
Total	2789	-8,98	4,76	-0,38	1,01	-1,07

Les résultats que l'on retrouve aux tableaux 2a et 2b de même qu'aux tableaux 2c et 2d nous donnent peu d'information sur la distribution empirique des différences. Afin d'ajouter un complément d'information à ces statistiques nous avons choisi de montrer la distribution des différences (Figures 3a et 3b) sur lesquelles ces statistiques sont justement basées pour la seule station du Mont-Louis puisque les autres stations donnent des résultats similaires. Les tableaux 2a et 2b étant muets sur le nombre d'événements extrêmes, nous avons choisi de comparer les différences avant l'application du filtre climatologique et une fois les données filtrées. Comme nous l'avons auparavant mentionné on constate à la figure 3a que le filtre a éliminé un nombre relativement important de valeurs extrêmes qui sont en grande majorité des extremums négatifs. Mentionnons que pour la figure 3a, le nombre de valeurs dans chaque intervalle de température peut s'avérer plus grand après filtrage puisque chaque fois, par exemple, que le filtre climatologique élimine un pixel de la matrice de 3 x 3, on doit recalculer la valeur moyenne SST qui peut alors se retrouver dans un intervalle de température différent. A la figure 3b nous avons comparé les différences provenant des données filtrées de jour et des données filtrées de nuit. Les données filtrées de nuit sont associées aux différences négatives que l'on avait préalablement expliquées par l'absence de la bande visible servant à la détection des nuages.

Il existe de nombreuses études qui ont validé les données du capteur AVHRR. Le tableau 3 montre une comparaison entre les résultats obtenus dans notre étude et quelques résultats publiés dans la littérature. On remarque que les résultats décrits au tableau 3 s'éloignent des écarts moyens obtenus au tableau 2a qui concerne les données non filtrées. De plus les écarts-types du tableau 2a sont jusqu'à 6 fois plus élevés que l'écart-type de 0,5 °C d'un pixel obtenu par Pearce

et al. (1989). Les statistiques calculées pour l'ensemble des stations à l'aide des données filtrées (tableaux 2b, 2c et 2d) sont plus près des résultats obtenus auparavant, montrant ainsi l'importance du filtre climatologique. En particulier, les résultats sont semblables à ceux de Notarstefano *et al.* (2006) obtenus à l'aide de senseurs de température installés sur des bouées dérivantes dans la mer Adriatique, et dont la profondeur variait de 10 à 40 cm. Près de 6000 couples (SST, SST_Z) ont donné une différence moyenne de -0,25 °C et un écart-type de 1,06 °C (Notarstefano *et al.*, 2006). Pour les autres études, les techniques de mesure *in situ* ainsi que les régions où ont eu lieu les comparaisons peuvent expliquer en partie les différents résultats. Selon Emery *et al.* (2001) les valeurs SST_Z des bouées fixes et des bouées dérivantes sont des mesures d'égales valeurs tandis que les données des instruments embarqués sur des navires sont considérées comme étant plus bruyantes. L'algorithme Non-Linear SST (NLSST) est plus sensible au contenu en vapeur d'eau que l'algorithme MCSST et est reconnu pour effectuer une meilleure correction atmosphérique, en particulier dans les régions où le contenu en vapeur d'eau est élevé. Aux latitudes concernées dans ce rapport, l'utilisation de NLSST au lieu de MCSST n'aurait probablement pas apporté de changements importants. Barton et Pearce (2005) et Barton (2007) ont utilisé une matrice de pixels de 5 x 5 centrée autour de la position du navire pour calculer une moyenne et un écart-type pour éliminer par la suite les données dont l'écart-type est supérieur à 0,5 °C, les considérant contaminées par les nuages. Ces pixels libres de nuage et l'utilisation de NLSST peuvent expliquer en partie les différences du tableau 3 concernant les données NOAA-16 durant le jour.

Les résultats obtenus dans la présente étude renforcent donc l'idée que l'utilisation de valeurs SST calculées avec des images individuelles est hasardeuse et peut conduire à des différences importantes avec les données *in situ* selon les conditions météorologiques et océanographiques existantes au moment de l'acquisition de l'image satellitaire.

Tableau 3. Résumé des études comparatives. BF, BD et IE signifient bouée fixe, bouée dérivante et instrument embarqué sur des navires respectivement. Le nombre d'observations est indiqué dans la colonne étiquetée par la lettre N.

Auteurs(s)	Instrument *in situ*	Satellite NOAA	Algorithme	Jour/Nuit	N	Biais (°C)	Écart-type (°C)
Ce rapport	BF	14, 16 et 17	MCSST	J + N	4569	-0,19	0,97
Notarstefano *et al.* (2006)	BD	12, 14, 15, 16 et 17	MCSST	J + N	5851	-0,25	1,06
Ce rapport	BF	14, 16 et 17	MCSST	J	1780	0,11	0,82
Ce rapport	BF	14, 16 et 17	MCSST	N	2789	-0,38	1,01
Ce rapport	BF	16	MCSST	J	749	0,01	0,76
Barton et Pearce (2005)	IE	16	NLSST	J	458	0,17	0,52
Barton (2007)	IE	12	NLSST	J + N	30	-0,41	0,79
Ce rapport	BF	16	MCSST	J + N	1901	-0,30	0,93
Barton (2007)	IE	16	NLSST	J + N	42	0,07	0,51

3.2 COMPARAISONS JOURNALIÈRES

Les moyennes journalières *in situ* sont calculées en moyennant les valeurs mesurées entre 00 :00 :00 et 23 :59 :59 UT. Le tableau 4a montre les statistiques des différences entre les moyennes journalières des valeurs non-filtrées, $<SST_U>$, et les moyennes journalières *in situ* $<SST_Z>$ que l'on pourra comparer avec les valeurs du tableau 4b qui contient les statistiques des différences entre les moyennes journalières des valeurs filtrées $<SST_F>$ et les moyennes journalières *in situ* $<SST_Z>$. De façon générale, l'utilisation de données filtrées génère à nouveau une amélioration de la précision des résultats. L'amélioration est toutefois moins importante pour la station de Rimouski qui se démarque ainsi des autres régions. Aussi, certains écarts maximums augmentent une fois les données filtrées, comme à la station de Rimouski où l'écart maximal passe de 3,93 °C à 4,12 °C. Ceci est le résultat du filtre climatologique qui a éliminé des valeurs instantanées de telle sorte que l'écart maximum était plus grand une fois les données filtrées.

Les statistiques basées sur la valeur médiane (soit la moyenne des médianes) des écarts des moyennes journalières (Tableau 4c) ne semblent pas très différentes de celles calculées avec la moyenne (Tableau 4b).

Tableau 4a. Statistiques des différences journalières $<SST_U>$ - $<SST_Z>$ basées sur les valeurs moyennes. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N.

Station	N	Minimum °C	Maximum °C	Moyenne °C	Écart-type °C	Asymétrie
Banc Beaugé	437	-8,24	3,71	-0,41	1,19	-2,18
Havre-Saint-Pierre	473	-9,71	5,02	-0,38	1,67	-0,78
Irving Whale	504	-8,62	4,34	-0,28	1,06	-1,63
La Perle	598	-11,98	3,70	-0,44	1,27	-2,65
Mont-Louis	709	-7,28	2,89	-0,36	1,15	-1,72
Rimouski	215	-5,34	3,93	-0,45	1,26	-0,33
Total	2936	-11,98	5,02	-0,38	1,27	-1,59

Tableau 4b. Statistiques des différences journalières $<SST_F>$ - $<SST_Z>$ basées sur les valeurs moyennes. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N.

Station	N	Minimum °C	Maximum °C	Moyenne °C	Écart-type °C	Asymétrie
Banc Beaugé	437	-4,28	3,71	-0,28	0,92	-1,06
Havre-Saint-Pierre	473	-9,71	5,02	-0,25	1,52	-0,62
Irving Whale	504	-5,01	3,65	-0,19	0,87	-0,64
La Perle	598	-4,62	3,45	-0,28	0,93	-0,59
Mont-Louis	709	-6,38	2,89	-0,24	0,95	-1,15
Rimouski	215	-5,24	4,12	-0,42	1,18	-0,11
Total	2936	-9,71	5,02	-0,26	1,06	-0,76

Tableau 4c. Statistiques des différences journalières $<SST_F>$ - $<SST_Z>$ basées sur les valeurs médianes. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N.

Station	N	Minimum °C	Maximum °C	Moyenne °C	Écart-type °C	Asymétrie
Banc Beaugé	437	-4,22	4,01	-0,22	0,93	-0,89
Havre-Saint-Pierre	473	-9,27	4,93	-0,23	1,54	-0,42
Irving Whale	504	-4,89	4,74	-0,10	0,90	-0,26
La Perle	598	-4,61	4,04	-0,19	0,95	-0,39
Mont-Louis	709	-6,39	3,24	-0,16	0,96	-1,14
Rimouski	215	-5,29	4,82	-0,38	1,24	-0,01
Total	2936	-9,27	4,93	-0,19	1,08	-0,60

3.3 COMPARAISONS HEBDOMADAIRES

Une moyenne hebdomadaire comprend la période qui débute le dimanche à 00 :00 :00 (UT) et se termine le samedi suivant à 23 :59 :59 (UT). Le tableau 5a montre les statistiques des différences entre les valeurs moyennes de températures des pixels non-filtrés $<SST_U>$ et les valeurs moyennes de températures in-situ, $<SST_Z>$. Le tableau 5b, présente les statistiques des différences entre les valeurs moyennes de températures des pixels filtrés $<SST_F>$ et les moyennes de températures *in situ* $<SST_Z>$. Les résultats de ces deux tableaux montrent que le filtre a réussi à diminuer l'ensemble des écarts minimums en éliminant des pixels anormalement froids probablement causés par des nuages non-détectés, mais le filtre a aussi du même coup légèrement réchauffé la plupart des écarts maximums. Toutefois, pour l'ensemble des stations le filtre a nettement amélioré les intervalles de confiance. Le filtre tend aussi à rendre les distributions plus symétriques en rapprochant de zéro les valeurs d'asymétrie. L'augmentation de précision a été la plus importante pour la station de La Perle (0,72 °C).

Tableau 5a. Statistiques des différences hebdomadaires $<SST_U>$ - $<SST_Z>$ basées sur les valeurs moyennes. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N.

Station	N	Minimum °C	Maximum °C	Moyenne °C	Écart-type °C	Asymétrie
Banc Beaugé	126	-4,92	1,31	-0,90	1,40	-1,17
Havre-Saint-Pierre	150	-7,22	2,41	-0,77	1,50	-1,04
Irving Whale	156	-10,93	2,60	-0,81	1,64	-2,42
La Perle	193	-10,80	2,04	-0,96	1,66	-2,05
Mont-Louis	203	-7,20	3,10	-0,76	1,32	-1,48
Rimouski	45	-10,09	1,20	-0,98	1,88	-3,22
Total	873	-10,93	3,10	-0,85	1,53	-1,92

Encore une fois, les résultats obtenus en utilisant la moyenne des valeurs médianes (Tableau 5c) semblent équivalents à ceux obtenus en utilisant la moyenne des valeurs moyennes (Tableau 5b).

Tableau 5b. Statistiques des différences hebdomadaires $<SST_F>$ - $<SST_Z>$ basées sur les valeurs moyennes. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N.

Station	N	Minimum °C	Maximum °C	Moyenne °C	Écart-type °C	Asymétrie
Banc Beaugé	126	-3,26	1,59	-0,23	0,74	-1,08
Havre-Saint-Pierre	150	-4,78	4,35	-0,15	1,28	-0,03
Irving Whale	156	-4,64	2,60	-0,19	0,81	-1,36
La Perle	193	-2,62	1,57	-0,19	0,72	-0,77
Mont-Louis	203	-2,85	3,10	-0,23	0,85	0,22
Rimouski	45	-3,44	1,73	-0,42	0,91	-0,50
Total	873	-4,78	4,35	-0,21	0,90	-0,31

Tableau 5c. Statistiques des différences hebdomadaires $<SST_F>$ - $<SST_Z>$ basées sur les valeurs médianes. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N.

Station	N	Minimum °C	Maximum °C	Moyenne °C	Écart-type °C	Asymétrie
Banc Beaugé	126	-3,37	1,35	-0,22	0,71	-1,16
Havre-Saint-Pierre	150	-4,44	5,08	-0,16	1,43	0,01
Irving Whale	156	-4,60	3,73	-0,13	0,90	-0,76
La Perle	193	-2,59	1,61	-0,18	0,75	-0,67
Mont-Louis	203	-3,20	3,09	-0,28	0,93	0,11
Rimouski	45	-2,95	2,74	-0,40	1,02	0,30
Total	873	-4,60	5,08	-0,21	0,97	-0,17

3.4 COMPARAISONS BIMENSUELLES

La première moyenne bimensuelle s'étale du premier jour du mois à 00 :00 :00 (UT) au 15 du mois à 23 :59 :59 (UT) tandis que la seconde moyenne bimensuelle débute le 16 du mois à 00 :00 :00 (UT) et se termine le dernier jour du mois à 23 :59 :59 (UT). Puisqu'aucune donnée provenant du mois de février n'est considérée dans ce rapport toutes les périodes bimensuelles ont pratiquement le même nombre de jours à un jour près. Le tableau 6a montre les statistiques des différences entre les valeurs moyennes de températures des pixels non-filtrés $<SST_U>$ et les valeurs moyennes de températures *in situ*, $<SST_Z>$. Le tableau 6b présente les statistiques des différences entre les valeurs moyennes de températures des pixels filtrés $<SST_F>$ et les valeurs moyennes des températures *in situ*, $<SST_Z>$. En comparant les résultats des tableaux 6a et 6b on constate que le filtre climatologique a réussi à éliminer des pixels froids en réchauffant les minimums moyens tout en conservant presque intact les maximums moyens. On peut en déduire que le filtre réussit à éliminer des statistiques des pixels froids qui sont probablement attribuables à des nuages non-détectés. Les statistiques ont en général profité de l'application du filtre. La comparaison entre les résultats des tableaux 6b et 6c semble indiquer qu'il n'y a pas vraiment de gain à utiliser la médiane au lieu de la moyenne. En général, on constate que plus la période de moyenne augmente et plus les données satellitaires sont près des valeurs *in situ*. Il y a peu de

différences entre les statistiques pour les diverses régions excepté encore une fois pour la station de Rimouski qui montre des erreurs plus importantes.

Tableau 6a. Statistiques des différences bimensuelles $<SST_U>$ - $<SST_Z>$ basées sur les valeurs moyennes. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N.

Station	N	Minimum °C	Maximum °C	Moyenne °C	Écart-type °C	Asymétrie
Banc Beaugé	62	-3,93	1,65	-0,84	1,28	-0,57
Havre-Saint-Pierre	73	-5,80	3,01	-0,75	1,39	-0,54
Irving Whale	75	-4,81	1,40	-0,86	1,33	-1,07
La Perle	93	-4,95	1,61	-0,89	1,17	-0,83
Mont-Louis	97	-4,70	2,57	-0,67	1,19	-0,83
Rimouski	19	-8,00	1,94	-0,93	1,98	-2,48
Total	419	-8,00	3,01	-0,80	1,30	-1,02

Tableau 6b. Statistiques des différences bimensuelles $<SST_F>$ - $<SST_Z>$ basées sur les valeurs moyennes. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N.

Station	N	Minimum °C	Maximum °C	Moyenne °C	Écart-type °C	Asymétrie
Banc Beaugé	62	-3,01	1,65	-0,10	0,69	-0,49
Havre-Saint-Pierre	73	-3,68	3,16	-0,07	1,33	0,16
Irving Whale	75	-2,67	1,40	-0,17	0,62	-0,61
La Perle	93	-2,28	1,61	-0,13	0,66	-0,65
Mont-Louis	97	-2,20	2,57	-0,12	0,76	0,37
Rimouski	19	-1,57	1,94	-0,31	0,88	1,11
Total	419	-3,68	3,16	-0,13	0,84	0,13

Tableau 6c. Statistiques des différences bimensuelles $<SST_F>$ - $<SST_Z>$ basées sur les valeurs médianes. Le nom de la station est suivi de la taille de l'échantillon N.

Station	N	Minimum °C	Maximum °C	Moyenne °C	Écart-type °C	Asymétrie
Banc Beaugé	62	-3,63	1,52	-0,14	0,76	-1,31
Havre-Saint-Pierre	73	-3,33	3,16	0,03	1,41	0,12
Irving Whale	75	-3,25	1,34	-0,15	0,77	-0,80
La Perle	93	-2,43	1,91	-0,15	0,77	-0,26
Mont-Louis	97	-3,92	2,79	-0,16	0,97	-0,61
Rimouski	19	-1,73	1,96	-0,33	0,91	0,87
Total	419	-3,92	3,16	-0,13	0,96	-0,14

3.5 LA QUALITÉ DES DONNÉES EN FONCTION DU NOMBRE DE PIXELS

Intuitivement, il devrait exister une certaine relation entre la fréquence d'échantillonnage d'un pixel au cours d'une même période et l'écart que l'on observe entre les moyennes <SST> et les moyennes *in situ*. D'un point de vue opérationnel il est intéressant de qualifier les images composites ; il devient alors pertinent de déterminer dans quelle mesure le nombre de pixels influence cet écart. D'ailleurs, la fréquence d'échantillonnage d'un pixel est une couche d'information qui est habituellement contenue dans les images (composites). Dans un premier temps, les différences absolues $|<SST_F> - < SST_Z>|$ ont été classées en fonction du nombre de pixels M composant la moyenne, puis pour chacune de ces classes, on a calculé les statistiques des erreurs. L'erreur moyenne absolue E pour une classe de pixels de taille N peut s'écrire :

$$E = 1/N \, \Sigma \, |<SST_F> - < SST_Z >| \qquad (3)$$

La figure 4 montre, pour les 6 stations analysées, les erreurs moyennes (E) en fonction des classes de pixels (M) pour les moyennes journalières sur lesquelles ont été appliquée une régression exponentielle non-linéaire (Balda, 2007) de la forme

$$E = C_0 + C_1 M^{C_2} \qquad (4)$$

où M est la classe de pixels et les C_i sont les coefficients calculés par la régression. Le terme C_0 dans ce modèle de régression permet de tenir compte d'un biais systématique qui est présent dans tous les ensembles de données. Les coefficients de détermination (R^2) ont été calculés de manière analogue à un modèle de régression linéaire soit le rapport entre la variance expliquée par la régression non-linéaire et la variance des données. Des coefficients de détermination variant de 0,75 à 0,99 ont été obtenus pour les diverses stations. Ajoutons toutefois que la valeur de probabilité (p-value) n'est pas disponible avec ce programme (Balda, 2007). L'équation (5) exprime la classe de pixels en fonction de l'erreur E

$$M = \left[\frac{E - C_0}{C_1} \right]^{1/C_2} \qquad (5)$$

Le même traitement a été réalisé pour les moyennes hebdomadaires (Figure 5). Les coefficients de détermination obtenus pour les moyennes hebdomadaires varient de 0,20 à 0,87. La station de Mont-Louis est la plus difficilement représentée par une régression de type exponentielle. Pour les moyennes bimensuelles (Figure 6) il en résulte, à toute fin pratique, des coefficients de détermination nuls ou encore très peu significatifs. Les tableaux 7a et 7b présentent les coefficients obtenus des régressions non-linéaires pour les périodes de 1 jour et de 7 jours. Nous avons jugé que les coefficients des régressions des périodes de 15 jours étaient non-pertinents dû aux faibles valeurs des coefficients de détermination. L'utilisation d'une série temporelle au moins deux fois plus longue serait nécessaire pour obtenir des régressions significatives pour les périodes de 15 jours. Ces coefficients peuvent être utilisés à l'aide de l'équation (5) afin de déterminer la quantité d'images nécessaires à l'obtention d'un niveau de précision recherché. Par exemple, à la station du Havre-Saint-Pierre les coefficients C_0 = -0,077, C_1 = 1,276 et C_2 =

-0,502, une fois substitués dans l'équation (5) donnent une valeur de M proche de 5 (images) en ayant fixé l'erreur E à 0,5 °C pour des moyennes journalières.

Tableau 7a. Coefficients des régressions non-linéaires des erreurs absolues journalières suivis du coefficient de détermination.

Station	C_0	C_1	C_2	R^2
Banc Beaugé	-0,245	0,992	-0,360	0,92
Havre-Saint-Pierre	-0,077	1,276	-0,502	0,99
Irving Whale	-1,053	1,798	-0,193	0,94
La Perle	0,398	0,403	-2,519	0,79
Mont-Louis	0,161	0,641	-0,723	0,75
Rimouski	0,000	1,130	-0,599	0,83

Tableau 7b. Coefficients des régressions non-linéaires des erreurs absolues hebdomadaires suivis du coefficient de détermination.

Station	C_0	C_1	C_2	R^2
Banc Beaugé	0,284	0,859	-0,941	0,74
Havre-Saint-Pierre	0,627	0,788	-0,894	0,53
Irving Whale	0,326	0,790	-1,265	0,56
La Perle	0,319	0,745	-1,329	0,74
Mont-Louis	3,327	-2,413	0,065	0,20
Rimouski	-0,046	2,740	-0,791	0,87

Lorsque les données proviennent d'une population caractérisée par une distribution normale, les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement (traduction du terme anglais kurtosis) se rapprochent de zéro. Ainsi, afin de déterminer le degré de normalité de nos classes de pixels, les valeurs des coefficients d'asymétrie et d'aplatissement ont été calculées pour chacune d'elles. Peu importe la station et la période, les coefficients peuvent varier de manière importante d'une classe de pixels à l'autre, ce qui tendrait à confirmer que les distributions empiriques ne sont pas normales. Toutefois, il n'existe pas de niveau de référence pour ces deux coefficients permettant de conclure qu'une distribution de données est normale. Nous avons donc effectué le test de normalité de Kolmogorov-Smirnov au niveau de confiance à 95% sur nos classes de pixels qui a confirmé que les distributions des données composant ces classes ne sont pas normales, sauf pour quelques classes de pixels pour la période de 15 jours.

Pour toutes les classes de pixels, deux méthodes ont été utilisées dans le calcul des intervalles de confiance (IC) à 95% soit : 1) pour tenir compte des classes de petites tailles ($N < 30$) nous avons supposé une distribution de Student à N - 1 degrés de liberté qui peut s'appliquer lorsque les données sont distribuées symétriquement et 2) avec la méthode des « percentiles bootstrap » qui a comme avantage d'être indépendante de la distribution des données. Pour cette dernière méthode, nous avons dans un premier temps généré aléatoirement (avec remise), pour chaque classe de pixels, 10 000 répliques et calculé la moyenne pour chacune d'elles. Les percentiles 2,5% et 97,5% de ces 10 000 moyennes ont par la suite été utilisés pour construire les IC. Le calcul des IC des erreurs moyennes absolues, qui sont représentés par les surfaces ombragées

dans les figures 4 à 6, relativise ces erreurs moyennes en rapport avec la variabilité des classes de pixel. Nous avons utilisé des surfaces ombragées afin de faire ressortir l'allure générale des IC qui sont définis uniquement pour des valeurs de M entières.

Il faut mentionner que les IC de la figure 4 auraient été essentiellement les mêmes si une distribution de Student avec N suffisamment grand (N > 9) avait été utilisée. Autour de N = 10 une distribution de Student donnerait un IC qui aurait une étendue autour de 0,1 °C plus grande que les percentiles bootstrap. Les IC de la figure 5 auraient été plus conservateurs (plus larges) si on avait opté pour une distribution de Student, mais comme le coefficient d'asymétrie varie d'une classe de pixels à l'autre, il nous a paru plus approprié d'utiliser les percentiles bootstrap qui sont moins sensibles à la valeur de l'asymétrie.

À la figure 6, les IC ont été déterminés en utilisant une distribution de Student au lieu des percentiles bootstrap qui ont tendance à donner des IC un peu trop optimistes lorsque N est petit (ici N < 10). Puisque l'erreur standard sur l'asymétrie est approximativement donnée par $(6/N)^{1/2}$ (voir p. 79 de Tabachnick et Fidell, 2007), nous considérons alors que l'asymétrie est importante si elle dépasse deux fois cette valeur. Les valeurs de N étant inférieures à 10, on se limitera aux IC dont les valeurs absolues de l'asymétrie est < 1, afin de limiter nos IC aux distributions qui sont quasi symétriques. De plus, avec une distribution de Student il est possible de se retrouver avec un IC ayant une limite inférieure négative ce qui n'est pas cohérent avec des erreurs absolues ; ces IC n'ont donc pas été considérés.

4.0 DISCUSSION

4.1 BIAIS DE TEMPÉRATURE

Dans le but de quantifier la qualité des images composites des températures des eaux de surface de l'EGSL produites au laboratoire de télédétection de l'IML, nous avons examiné les statistiques provenant des différences entre les moyennes des valeurs SST et les moyennes des valeurs *in situ*, SST_Z, provenant de six stations du réseau de thermographes pour la période s'étalant du mois d'août 1995 au mois d'août 2004. L'EGSL est un milieu fort dynamique où durant la période de mai à octobre la température de surface peut varier entre [-1,8 °C, 25 °C].

Les biais des valeurs instantanées observés aux six stations se comparent à ceux retrouvés dans la littérature. Toutefois, dans ces études, il n'est pas fait mention des écarts extrêmes observés. Plusieurs raisons expliquent ces extrêmes dont la vapeur d'eau et les aérosols qui contribuent à refroidir le signal infrarouge. C'est toutefois la présence en altitude ou bien encore au sol de nuages non-détectés, qui est probablement responsable en grande partie des écarts minimums observés. En ce sens, l'amélioration de la détection des nuages pourrait contribuer à réduire la présence de ces minimums extrêmes et il est probable que ceci permettrait de rapprocher le biais moyen de zéro.

La présence d'un front thermique à proximité d'une station donnée, peut aussi expliquer certains écarts minimums ou maximums, car la température *in situ* SST_Z est ponctuelle tandis que la valeur instantanée de température d'un pixel, est en fait la valeur moyenne d'une matrice 3 x 3

(environ 10 km^2) dont le pixel central correspond à la position de la station. Ceci pourrait en partie expliquer les moins bonnes statistiques obtenues pour la station Rimouski située dans un environnement estuarien caractérisé par un mélange complexe de diverses masses d'eau. Bien que le réchauffement diurne puisse occasionner des écarts allant de 3 °C à 4 °C ils sont, plus souvent qu'autrement, autour de 1 °C (Gentemann *et al.*, 2003 ; Notarstefano *et al.*, 2006). On peut donc difficilement attribuer au seul réchauffement diurne les écarts maximums du tableau 4b.

Le système informatique qui produit les images composites calcule une moyenne arithmétique à chaque pixel pour une période déterminée. Par la suite un traitement similaire est appliqué aux données *in situ* pour pouvoir comparer ces deux ensembles de données. Nous avons aussi calculé la moyenne des médianes des différences afin de déterminer si cette méthode améliorerait les intervalles de confiance de nos résultats. Les comparaisons journalières, hebdomadaires et bimensuelles ont montré que ces deux méthodes sont équivalentes.

Les moyennes journalières et hebdomadaires des différences $\langle SST_F \rangle - \langle SST_Z \rangle$ que nous avons obtenues sont sensiblement les mêmes et peuvent se résumer à l'intervalle [-0,4 °C, -0,2 °C], tandis que les écarts moyens bimensuels se limitent à l'intervalle [-0,3 °C, -0,1 °C]. Les résultats montrent aussi que l'écart-type de $\langle SST_F \rangle - \langle SST_Z \rangle$ à la station du Havre-Saint-Pierre et, dans une moindre mesure, à la station Rimouski est plus grand qu'aux quatre autres stations. Ceci suggère que les processus physiques (marée, remontée d'eau froide, front thermique etc.) qui gouvernent la variabilité temporelle des températures de surface aux stations du Havre-Saint-Pierre et de Rimouski sont différents (propres à ces stations) ou encore génèrent des effets sur la température de surface nettement plus prononcés qu'aux autres stations. Dans la plupart des cas, cette variabilité est attribuable à la marée dont la période est de 12h25, ainsi qu'aux passages d'événements météorologiques qui peuvent avoir une période variant de quelques jours à 10 jours. Bourque et Kelley (1995) ont ainsi trouvé que les événements de vent dans le détroit de Jacques-Cartier, où est localisée la station du Havre-Saint-Pierre, étaient corrélés avec des remontées d'eau froide. Lorsque la distribution temporelle des mesures SST est insuffisante pour résoudre le signal moyen *in situ* (repliement de spectre[3]) il peut en résulter des écarts importants comme ceux qui ont été observés.

4.2 ANALYSE SPECTRALE

Pour évaluer l'importance de la variabilité temporelle à nos six stations de validation, la densité spectrale de puissance des séries temporelles de températures *in situ* pour les années 2002 - 2004 a été calculée. Les résultats montrent qu'en moyenne de 80% à 90% de la variance est attribuable aux événements météorologiques qui ont une période de 2 à 10 jours tandis que l'essentiel de la variance résiduelle (10% à 20%) est associé aux composantes de la marée semi-diurne et diurne et au cycle de vive-eau morte-eau. Pour illustrer cette variabilité, nous avons tracé à la figure 7 les moyennes des spectres de puissance en fonction de la fréquence en cycle par jour (cpj), où la surface sous la courbe est directement proportionnelle à la variance, car nous avons multiplié chaque estimation de densité spectrale par sa fréquence respective (Emery et Thomson, 2001). Ainsi, on constate à la figure 7 que la variance associée aux événements météorologiques, qui

[3] Repliement de spectre est une traduction du terme anglais « aliasing ».

sont dans la bande de fréquence de 0,1 - 0,5 cpj, est la plus importante à la station du Havre-Saint-Pierre de même que la variance des composantes semi-diurnes mesurée autour de 2 cpj. Cette forte variabilité nous permet d'expliquer les statistiques des différences obtenues précédemment à la station du Havre-Saint-Pierre qui dominait parmi les autres stations.

Ajoutons aussi que toutes les stations montrent un pic de puissance à la fréquence de 1 cpj qui selon nous est dû au réchauffement diurne plutôt qu'à la marée diurne. Notons en premier que l'intensité du pic de puissance à 1 cpj mesuré à chaque station est proportionnelle à l'amplitude du cycle diurne moyen (Figure 2). En second, nous avons calculé la densité spectrale de puissance des données de températures mesurées à 30 m de profondeur à la station du Mont-Louis pour les années 2002 - 2004, puis, par la suite nous avons tracé le spectre moyen résultant à la figure 7 (voir courbe rouge). Il est fort probable que la disparition du pic de puissance à 1 cpj calculé à partir des températures à 30 m implique qu'en surface la variance provient plutôt du cycle diurne de réchauffement pendant les heures de clarté et de refroidissement pendant les heures d'obscurité (Figure 2).

Nous avons également calculé la densité spectrale de puissance à partir des données de températures au fond (26 m) à la station La Perle. On observe une augmentation considérable de l'énergie dans la bande météorologique (0,1 - 0,5 cpj) tandis que le pic de puissance à 1 cpj nous apparaît inchangé (Figure 7, voir courbe rouge à la station La Perle). Comparativement aux résultats obtenus à Mont-Louis, il se peut que la forte augmentation de la variance dans la bande météorologique (0,1 - 0,5 cpj) observée à La Perle soit due aux mouvements verticaux de la thermocline associés aux changements de direction du vent qui entraînent soit des remontées ou des descentes d'eau sur le fond en pente du site de La Perle. Le site du Mont-Louis est quant à lui au milieu de la gyre d'Anticosti, où la profondeur locale de 325 m et la grande distance de la côte font en sorte que ce site est beaucoup moins affecté par les remontées et descentes d'eau causées par les vents. Un autre facteur contribuant à la plus grande variance de température observée à 26 m à La Perle comparativement à celle observée à 30 m à Mont-Louis est le plus fort gradient vertical de température à 26 m à La Perle. En effet, pour le mois d'août par exemple, l'écart moyen de température entre 20 m et 30 m de profondeur est de 6,2 °C à la station La Perle tandis qu'il n'est que de 2,7 °C à la station du Mont-Louis.

Pour estimer les intervalles de confiance des spectres de puissance de la figure 7 au niveau de confiance α, on peut utiliser une relation similaire à celle de Jenkins et Watts (1968) équation 3.3.10 de même que leur figure 3.10 soit

$$\Pr\left\{\frac{\nu}{\chi_\nu(1-\alpha/2)} < \frac{\Gamma(f)}{S_{yy}(f)} \le \frac{\nu}{\chi_\nu(\alpha/2)}\right\} = 1-\alpha/2 \qquad (6)$$

où $\Gamma(f)$ est le spectre théorique et $S_{yy}(f)$ le spectre estimé. Les degrés de liberté équivalents ν sont donnés à la figure 7 et χ_ν est une variable du khi-carré à ν degrés de liberté.

4.3 EFFETS DE LA PÉRIODE P DES COMPOSITES SUR LES RÉSULTATS

Les résultats (tableaux 4b, 5b et 6b) obtenus indépendamment pour chacune des trois périodes peuvent être interprétés comme un indice (dans l'espace et le temps) de la qualité des images composites en fonction de la période P (en jours) des moyennes. Ces résultats peuvent à leur tour être utilisés pour tenter de définir un modèle plus général du comportement des erreurs en fonction de la période de moyenne. Ainsi les moyennes des différences globales (MG) obtenues pour les trois périodes (P = 1, 7 et 15 jours) ont servi à calculer un modèle de régression linéaire ayant un coefficient de détermination de 0,86 :

$$MG = 0{,}04 \ln P - 0{,}27 \qquad (7)$$

Nous avons choisi ce modèle car son comportement asymptotique fait tendre vers zéro la moyenne globale avec l'augmentation de la période, ce qui intuitivement nous semble plus physiquement acceptable qu'un modèle représenté, par exemple, par une ligne droite où l'erreur augmente lorsque P devient grand.

Il est possible d'utiliser la même approche pour les écarts-types globaux des différences (EG) obtenus des trois périodes, ce qui permet de calculer un modèle de régression linéaire avec un coefficient de détermination de 0,99 :

$$EG = 1{,}06 P^{-0{,}09} \qquad (8)$$

Nous avons calculé le coefficient d'asymétrie pour chacun de nos ensembles de données. Les résultats n'indiquent pas de tendance précise à chacune des stations mais plutôt un comportement local qui varie selon la période. Il peut être intéressant de déterminer si nos ensembles de données sont de nature gaussienne particulièrement dans l'élaboration d'intervalles de confiance. Puisque le coefficient d'asymétrie à lui seul ne peut déterminer si une distribution est gaussienne nous avons effectué un test de normalité Kolmogorov-Smirnov à nos ensembles de données. Nous avons regroupé au tableau 8 les résultats de ce test où l'hypothèse nulle H_0 se définit ainsi : les données sont distribuées normalement. Ces résultats montrent clairement que ces ensembles de données ne sont pas Gaussiens ni localement ni globalement à quelques exceptions près.

Tableau 8. Test de normalité Kolmogorov-Smirnov appliqué aux données des statistiques se retrouvant aux tableaux 4b, 5b et 6b. La valeur 0 indique que l'hypothèse nulle, H_0, ne peut être rejetée au niveau de confiance de 5% tandis que la valeur 1 indique H_0 peut être rejetée au niveau de confiance de 5%.

Station	Période (jours)	1	7	15
Banc Beaugé		1	1	1
Havre-Saint-Pierre		1	0	0
Irving Whale		1	1	1
La Perle		1	1	1
Mont-Louis		1	1	1
Rimouski		1	1	0
Total		1	1	1

Toutefois, lorsque les données sont prises dans leur globalité on observe une nette tendance vers une distribution symétrique avec l'augmentation de la période. Il est possible de résumer les valeurs d'asymétrie globales (AG) en fonction de la période P via une régression linéaire avec un coefficient de détermination de 0,94 :

$$AG = 0{,}31 \ln P - 0{,}79 \qquad (9)$$

Bien que ces modèles statistiques (éqs. 7-9) soient basés uniquement sur trois points (1, 7 et 15 jours), ils résument de manière succincte le comportement global des différences pour des périodes allant de 1 à 15 jours et représentent en quelque sorte une empreinte des données de base (SST, SST_Z) utilisées dans ce rapport. Ce modèle pourrait éventuellement servir au calcul d'anomalies tout en gardant à l'esprit que les disparités régionales se trouvent noyées dans ces moyennes globales.

4.4 ERREUR ABSOLUE

Les régressions appliquées aux erreurs moyennes journalières expliquent une bonne partie de la variance à toutes les stations, ce qui vient appuyer l'idée qu'en général, plus il y a d'images plus faible sera l'erreur. La figure 4 montre que les IC sont définis uniquement pour les classes où M < 4-5. Toutefois cela importe peu car plus de 90 % des observations se retrouvent dans les 3 premières classes (M=1-3). On peut considérer que les erreurs journalières sont dans le pire cas (M=1) de 0,75 °C (± 0,10 °C) sauf à la station Rimouski où l'erreur serait de 1,1 °C (± 0,18 °C) tandis qu'à la station du Havre-Saint-Pierre elle serait de 1,2 °C (± 0,14 °C).

Les résultats des régressions obtenus pour des périodes de 7 jours (Figure 5) montrent une diminution des corrélations lorsqu'on les compare aux corrélations provenant des erreurs journalières, seules les stations de Rimouski et La Perle faisant exception. On constate qu'à la figure 5 les erreurs hebdomadaires maximales sont (en considérant le cas M = 1) au plus de 1,4 °C - 1,7 °C sauf à la station du Havre-Saint-Pierre où l'erreur est de 1,9 °C. À la station Rimouski nous ne pouvons pas nous prononcer puisque nous n'avons pas été en mesure de construire des IC entièrement positifs. Toutefois, les erreurs diminuent de manière systématique

avec l'augmentation de M et deviennent < 0,5 °C vers M > 3, à quelques exceptions près, tandis qu'à la station du Havre-Saint-Pierre les erreurs sont systématiquement > 0,5 °C pour M < 7.

Excluant la station La Perle, il n'y a pratiquement plus de corrélation entre les erreurs bimensuelles moyennes et la classe de pixels (Figure 6). On ne peut estimer les erreurs maximales pour la classe M = 1 à cause des IC non-définis. Toutefois, il est fort probable que les plus fortes erreurs bimensuelles seraient observées à la station du Havre-Saint-Pierre. De plus, sur la base des classes ayant des IC définis, il semble probable que les erreurs bimensuelles soient d'au plus 1,0 °C aux stations du Banc Beaugé, de La Perle et de l'Irving Whale.

5.0 CONCLUSIONS

Les résultats obtenus permettent une meilleure interprétation des images composites produites au laboratoire de télédétection de l'IML. Ce rapport est une première tentative de validation et devrait servir de balise aux utilisateurs d'images composites SST.

Les statistiques des différences ont fait ressortir des disparités régionales significatives qui sont en quelque sorte un reflet de la variabilité des températures de surface *in situ*. En effet, les différences mesurées aux stations du Banc Beaugé et de La Perle montrent la même variabilité (ou variance) de même que les stations Irving Whale et du Mont-Louis à ± 0,1 °C près. Suivent par ordre de variabilité croissante les stations de Rimouski et du Havre-Saint-Pierre pour chacune des périodes en incluant les différences instantanées. Il est clair que les différences moyennes obtenues sont attribuables à deux sources d'erreurs. Une première source d'erreur concerne les « effets instantanés » c'est-à-dire les erreurs individuelles reliées à un pixel (front, cycle diurne, nuage non-détecté, etc.) tandis que la seconde source d'erreur concerne les effets de repliement de spectre (marée, forcing météorologique, remontée d'eau froide). Il est toutefois impossible d'estimer dans quelle proportion ces deux sources d'erreur contribuent à la variance totale. Afin de minimiser l'effet de repliement de spectre, il apparaît donc important d'utiliser les données provenant de plusieurs satellites dont les temps de passage couvrent aussi bien que possible le cycle diurne. En ce sens, l'utilisation de données provenant de satellites géostationnaires pourrait améliorer la qualité des températures moyennes calculées en permettant l'acquisition de données à toutes les 30 minutes. Cette solution ne pourrait toutefois pas améliorer la qualité des moyennes en dehors des zones d'observation de ces satellites (> 60 °N).

De façon générale, les résultats indiquent que plus le nombre d'images composant une moyenne est grand, meilleure est la précision de la moyenne. Les statistiques des erreurs absolues en fonction du nombre de pixels ont permis d'estimer l'erreur maximale pour les périodes de 1 jour et de 7 jours pour la plupart des trois régions que nous avons caractérisées en terme de leur niveau de variabilité. Ceci est intéressant du point de vue opérationnel puisqu'il est possible de qualifier une image composite en fonction du nombre de pixels dans le temps. En général, on observe, avec l'augmentation de la période, une diminution de la corrélation de même qu'une diminution du nombre de classes ayant un IC défini. Ceci est fort probablement attribuable au nombre de classes qui tend à augmenter tandis que la taille de l'échantillon est inversement reliée

à la longueur de la période sur laquelle nous calculons les moyennes (de 1 et 7 jours). Ainsi pour estimer, entre autre, l'erreur maximale bimensuelle il serait nécessaire que les statistiques couvrent une plus grande période de temps que celle présentement utilisée, afin d'augmenter la représentativité statistique de ces classes de pixels.

Finalement, nous prévoyons, grâce à la disponibilité croissante de données d'insolation et de vent provenant de bouées océanographiques installées dans l'EGSL, être en mesure de mieux caractériser le cycle du réchauffement et refroidissement diurne. Nous avons aussi l'intention d'ajouter des senseurs de température à une profondeur de 10 m afin d'essayer de déterminer l'origine des pics de puissance à 1 cpj que nous avons observés à nos stations de validation.

6.0 REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier André Gosselin, analyste en informatique à la DAISS (Direction des avis et de l'information et du soutien technique), pour l'élaboration du code informatique nécessaire à l'extraction des données géo-référencées SST des images composites produites au laboratoire de télédétection de l'IML ainsi que de la mise en oeuvre du filtre climatologique. Ils remercient également Rémi Desmarais (DAISS) qui est en charge de la logistique du réseau de thermographes, Daniel Thibeault (DAISS) qui s'occupe de l'étalonnage des thermographes, de même que le personnel de la GCC pour leur contribution au réseau de thermographes. Les auteurs remercient aussi les réviseurs Caroline Lafleur (DAISS) et Peter Galbraith (direction des sciences océaniques et de l'environnement, DSOE) pour leurs commentaires constructifs. Le système opérationnel de production d'images SST a été réalisé en grande partie à l'aide de subventions de l'Agence Spatiale Canadienne.

7.0 RÉFÉRENCES

Balda, M. 2007. LMFsolve : Levenberg-Marquardt-Fletcher's algorithm for nonlinear least squares problem. Mathworks, MATLAB Central, File Exchange, Id=16063. http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/ (page consultée le 2 juillet 2009).

Barton, I.J. and Pearce, A.F. 2005 Validation of GLI and Other Satellite-Derived Sea surface Temperatures Using Data from Rottnest Island Ferry, Western Australia. Journal of Oceanography Vol. 62:303-310, 2006.

Barton, I.J., 2007. Comparison of *In Situ* and Satellite-Derived Sea Surface Temperatures in the Gulf of Carpentaria. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 24: 1773-1784.

Bourque, M.-C. and Kelley, D.E. (1995). Evidence of wind-driven upwelling in Jacques-Cartier strait. Atmosphere-Ocean 33 (4): 621-637.

Breaker, L.C., Armstrong, E.M., and Endris, C.A. 2010. Establishing an objective basis for image compositing in satellite oceanography. Remote sensing of Environment 114: 345-362.

Donlon, C., Robinson, I., Casey, K. S., Vazquez-Cuervo, J., Armstrong, E., Arino, O., Gentemann, C., May, D., LeBorgne, P., Piollé, J., Barton, I., Beggs, H., Poulter, D.J.S., Merchant, C.J., Bingham, A., Heinz, S., Harris, A., Wick, G., Emery, B., Minnet, P., Evans, D., Liewellyn-Jones, D., Mutlow, C., Reynolds, R.W., Kawamura, H., and Rayner N. 2007. The Global Ocean Data Assimilation Experiment High-Resolution Sea Surface Temperature Pilot Project. Bull. Amer. Meteor. Soc. 88:1197-1213 doi:10.1175/BAMS-88-8-1197.

Emery, W.J. and Thomson, R.E. 2001. Data analysis methods in physical oceanography. Pergamon Elsevier Science, (London) 638 p.

Emery, W.J., Castro, S., Wick, G.A., Schluessel, P., and Donlon, C. J. 2001. Estimating sea surface temperature from infrared satellite and *in situ* temperature data. Bull Am. Meteor. Soc., 82: 2773 - 2785.

Galbraith, P.S., Pettipas, R.G., Chassé, J., Gilbert, D., Larouche, P., Pettigrew, B., Gosselin, A., Devine. L., and Lafleur, C. 2010. Physical oceanographic conditions in the Gulf of St. Lawrence in 2009. DFO CSAS Res. Doc. 2010/035, 77 pp.

Gemmill, W., Katz, B. and Li, X. 2007. Daily real-time, global sea-surface temperature – High-resolution analysis : RTG_SST_HR. NOAA/NWS/NCEP/MMAB office note 260, 39 p. http://polar.ncep.noaa.gov/sst/ (page consultée le 21 novembre 2010).

Gentemann, C. L., Donlon, C. J., Stuart-Meneth, A. C., and Wentz, F. J. 2003. Diurnal signals in satellite sea surface temperature measurements. Geophysical Research Letters, 30(3), 1140.

Gilbert, D., Vézina, A.F., Pettigrew, B., Swain, D.P., Galbraith, P.S., Devine, L., et Roy, N. 1997. État du golfe du Saint-Laurent : conditions océanographiques en 1995. Rapp. tech. can. hydrogr. sci. océan. 191: xii + 113 p.

Guillot, P. 2001. Étude de la variation spatio-temporelle de la température de surface de l'eau dans le golfe du Saint-Laurent à l'aide d'images satellitaires infrarouges. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 174 p.

Jenkins, G.M. and D.G. Watts. 1968. Spectral Analysis and its Applications. Holden-Day, San Francisco, Calif., 525 p.

Koeller, P., Fuentes-Yaco, C., Platt, T., Sathyendranath, S., Richards, A., Ouellet, P., Orr, D., Skuladottir, U., Wieland, K., Savard, L., and Aschan, M. 2009. Basin-scale coherence in phenology of shrimps and phytoplankton in the North Atlantic Ocean. Science, 324: 791-793.

McClain, E. P., Pichel, W.G., and Walton, C.C. 1985. Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures, J. Geophys. Res., 90, 11,587-11,601.

Nostarstefano, G., Mauri, E., and Poulain, P.M. 2006. Near-surface thermal structure and surface diurnal warming in the Adriatic Sea using satellite and drifter data. Remote Sensing of Environment, 101, 194-211.

Ouellet, M., B. Petrie and J. Chassé. 2003. Temporal and spatial scales of sea-surface temperature variability in Canadian Atlantic waters. Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci. 228: v + 30 pp.

Ouellet, P., Savard, L., and Larouche, P. 2007. Spring oceanographic conditions and Northern Shrimp (Pandalus borealis) recruitment success in the northwestern Gulf of St. Lawrence. AZMP Bull. PMZA, 6:47-52 (Cote: 2007, 3(13)).

Pearce, A.F., Prata, A.J., and Manning, C.R. 1989. Comparisons of NOAA/AVHRR-2 sea surface temperatures with surface measurements in coastal waters. Int. J. Remote Sens., 10: 37-52.

Podesta, G.P., Arbelo, M., Evans, R.H., Kilpatrick, K.A., Halliwell, V., and Brown, J. 2003. Errors in high-latitude SSTs and other geophysical products linked to NOAA-14 AVHRR channel 4 problems. Geophysical Research Letters 30(11):1548-, doi: 10.1029/2003GL017178.

Qiu, C., D. Wang , Kawamura, H., Guan, L., and Qin, H. 2009. Validation of AVHRR and TMI-derived sea surface temperature in the northern South China Sea. Continental Shelf Research 29: 2358-2366.

Reynolds, R. W., Smith, T. M., Liu, C., Chelton, D. B., Casey, K. and Schlax, M. G., 2007. Daily high-resolution-blended analyses for sea-surface temperature. J. Climate 20: 5473-5496.

Reynolds, R. W. and Chelton, D. B., 2010. Comparisons of daily sea surface temperature analyses for 2007-08, J. Climate 23: 3545-3562.

She, J., Hoyer, J. L., and Larsen, J. 2005 Assessment of sea surface temperature observational networks in the Baltic Sea and North Sea. J. Mar. Syst. 65: 314-335.

Tabachnick, B.G., and Fidell, L.S. (2007). Using multivariate statistics (5th ed.). Boston: Allyn and Bacon, 1008 p.

Yokoyama, R., and Tanba, S. 1991. Estimation of sea surface temperature via AVHRR of NOAA-9 comparison with fixed buoy data. International Journal of Remote Sensing 12: 2513-2528.

Zhang, H.-M., Reynolds, R. W. and Smith, T. M. 2004. Bias characteristics in the AVHRR sea surface temperature. Geophys. Res. Letters 31, L01307, doi: 10.1029/2003GL018804.

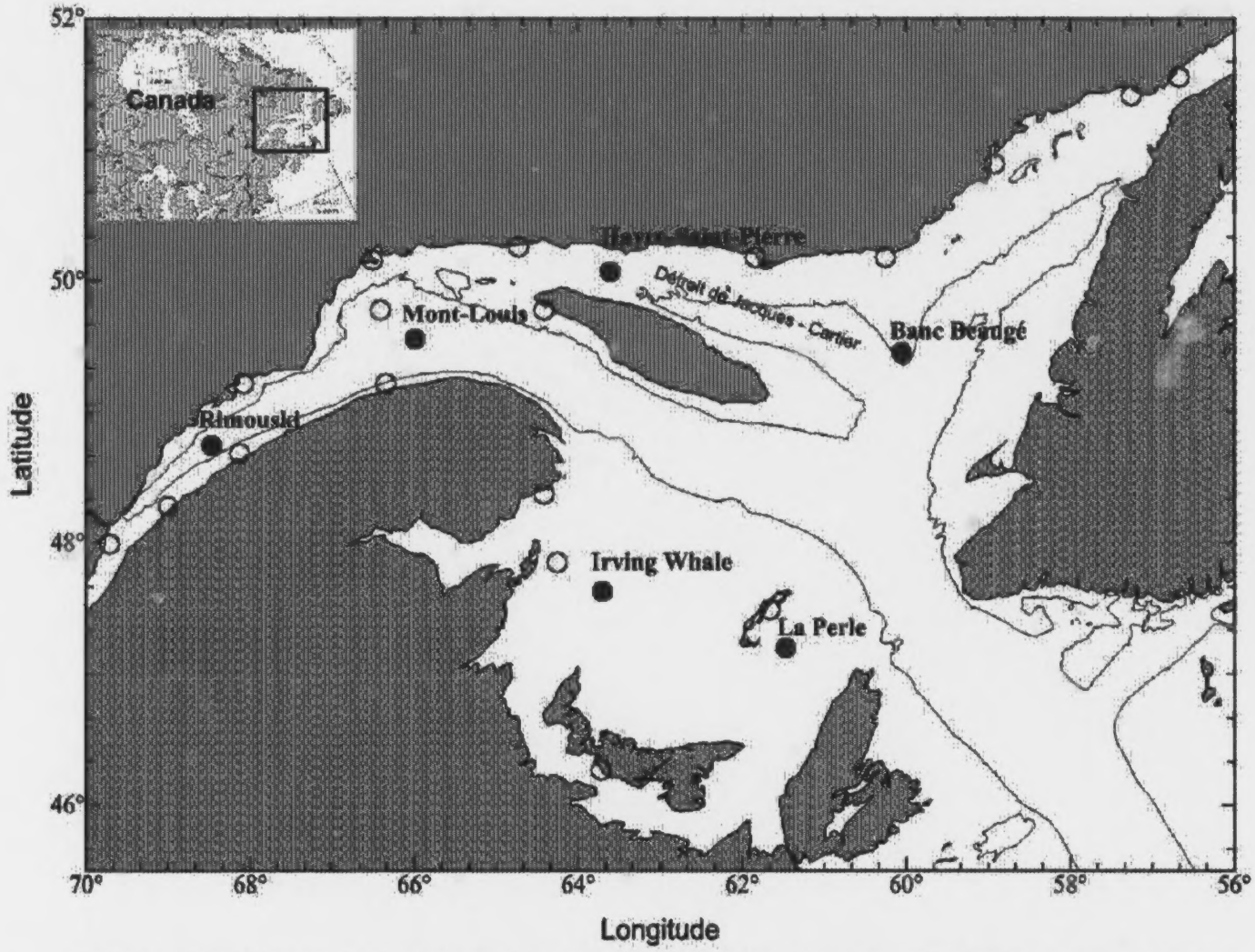

Figure 1. La position des six stations de validation est indiquée par les cercles pleins tandis que les cercles vides indiquent la position des autres stations de monitorage du réseau de thermographes. L'isobathe de 200 m est tracée.

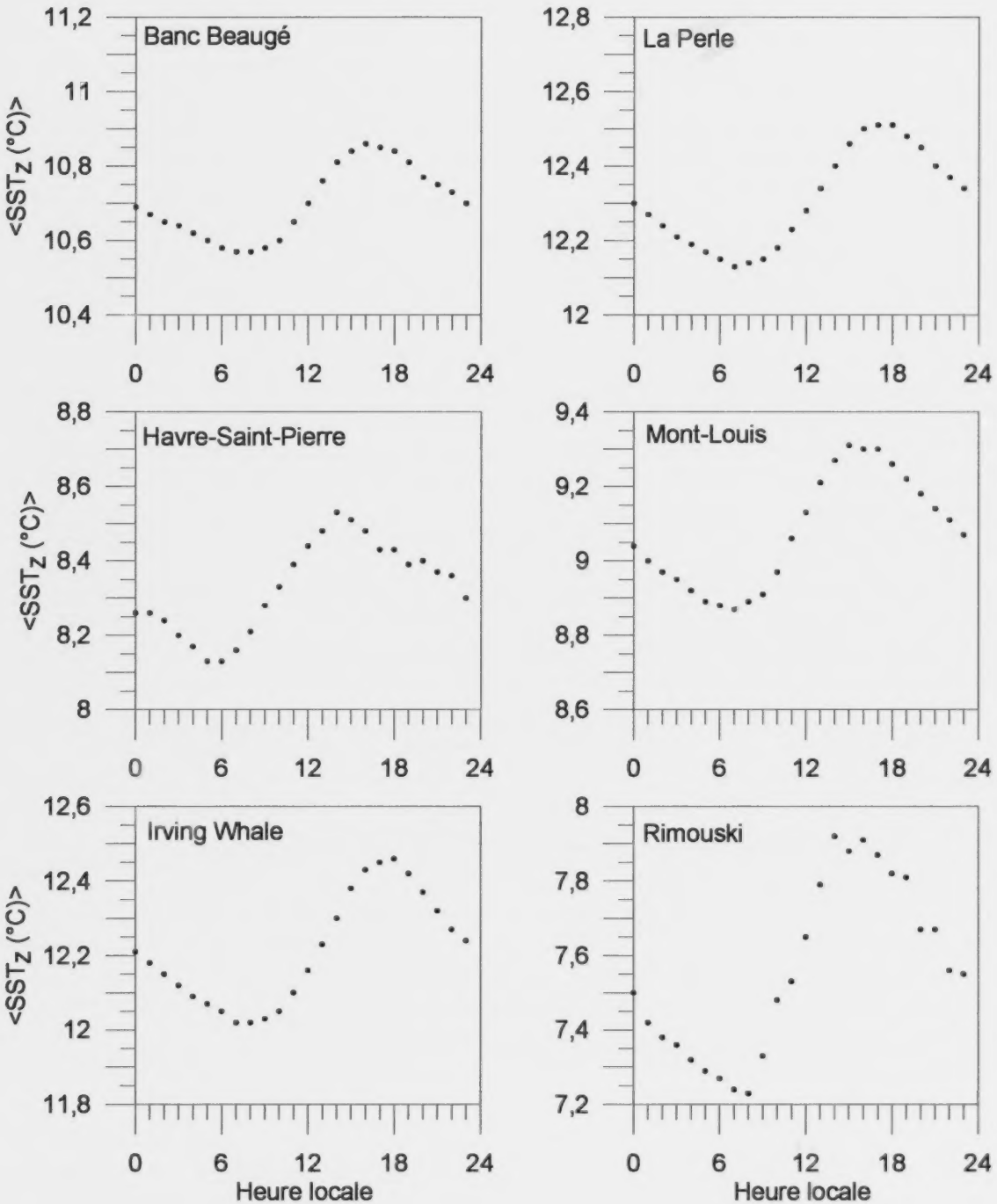

Figure 2. Cycle journalier moyen des températures *in situ*. Les heures locales des stations du Banc Beaugé, de l'Irving Whale et de La Perle sont représentées dans le fuseau horaire HAA (= UTC - 3h) tandis que celles des stations de Rimouski, du Havre-Saint-Pierre et du Mont-Louis sont dans le fuseau horaire HAE (= UTC - 4h).

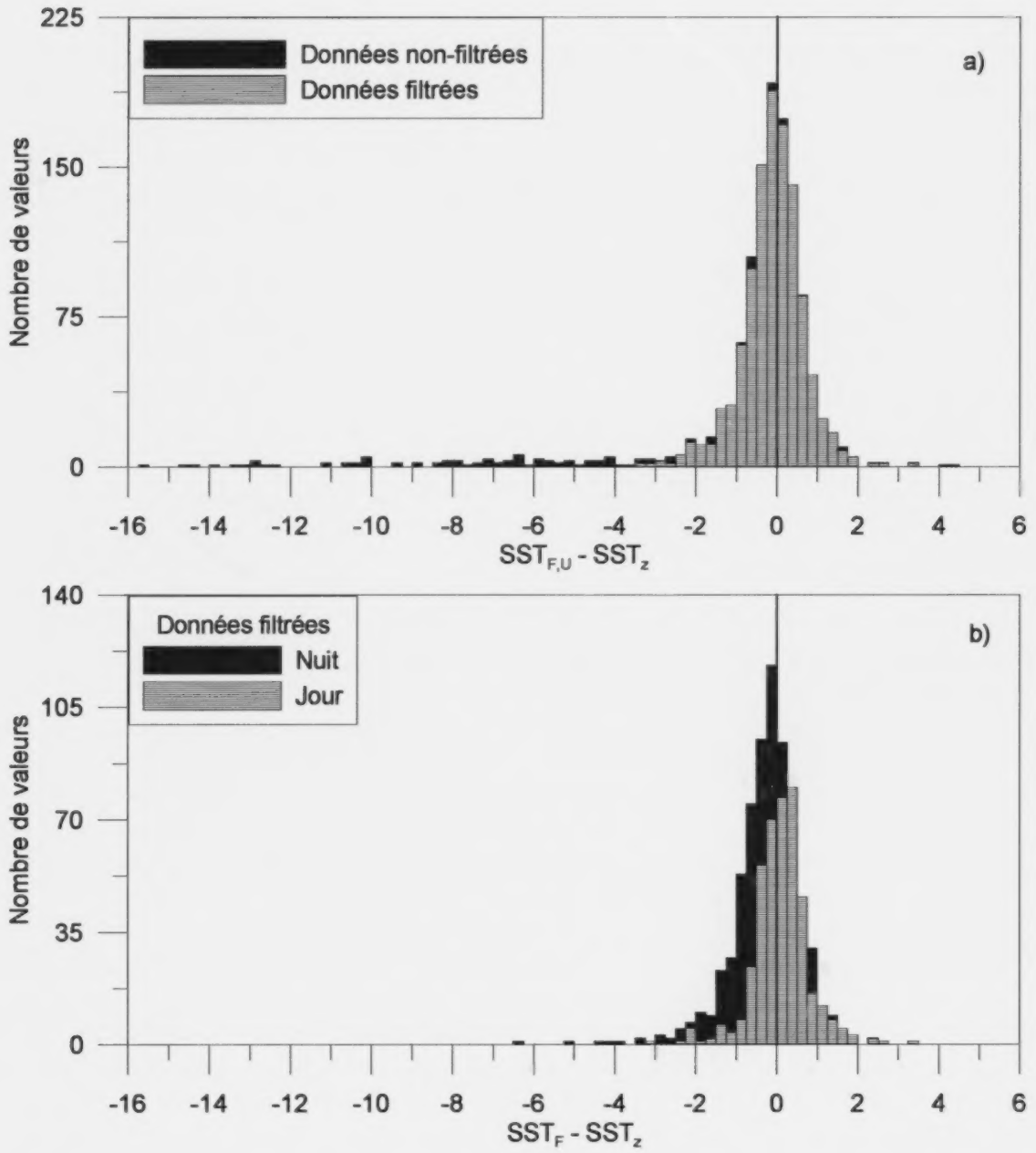

Figure 3. Comparaisons des distributions des différences instantanées à la station du Mont-Louis. a) En considérant les données de jour et de nuit, les différences SST_U - SST_Z en rouge sont comparées aux différences SST_F - SST_Z en gris pâle. b) En considérant uniquement les données filtrées, les différences SST_F - SST_Z de nuit en rouge, sont comparées avec celles de jour, en gris pâle.

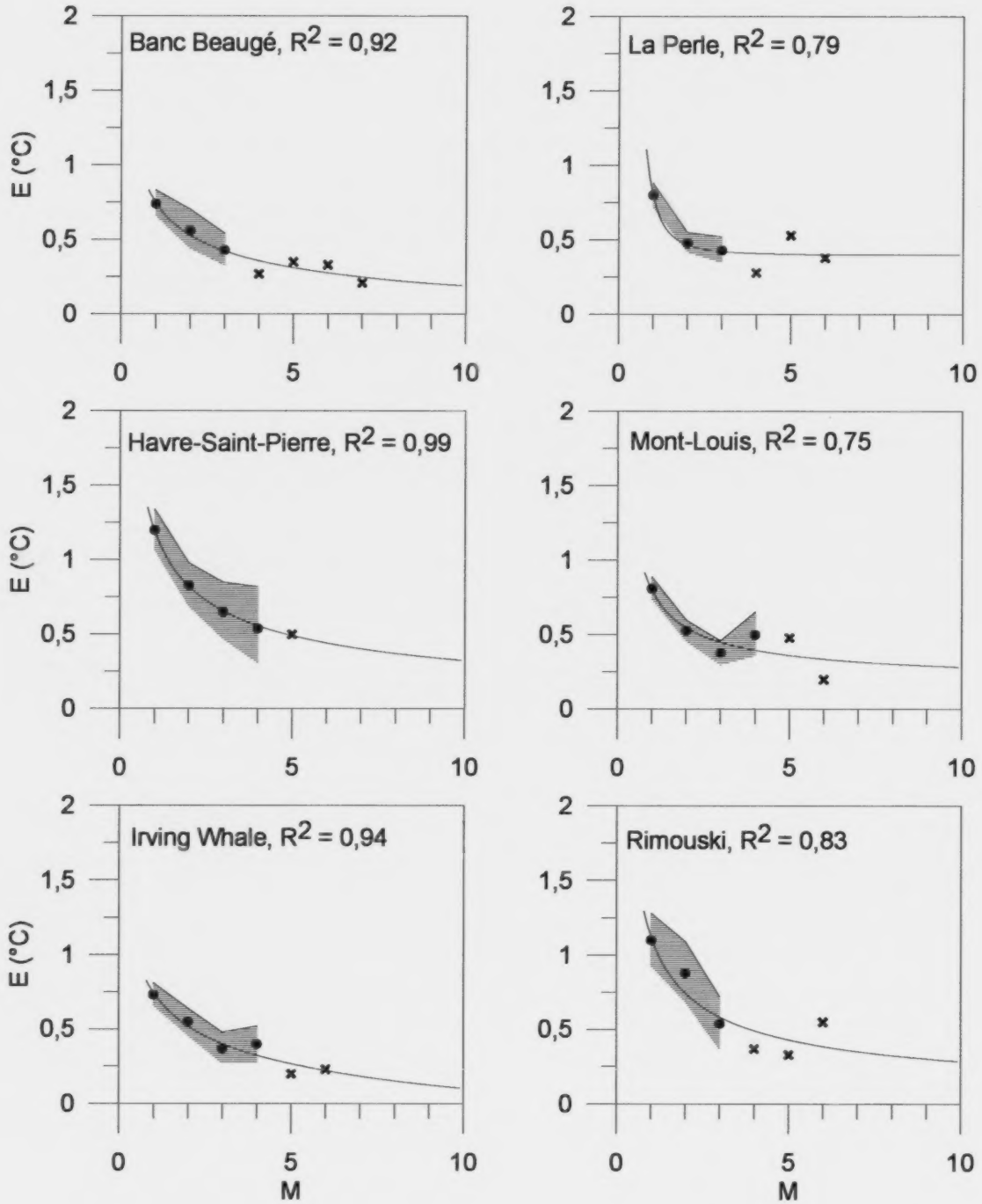

Figure 4. L'erreur absolue des moyennes journalières en fonction de la classe de pixels M. La régression non-linéaire est représentée par la ligne continue tandis que la surface ombragée est l'intervalle de confiance à 95% obtenu par la méthode des percentiles bootstrap (× si N < 10 ; • autrement). R^2 désigne le coefficient de détermination.

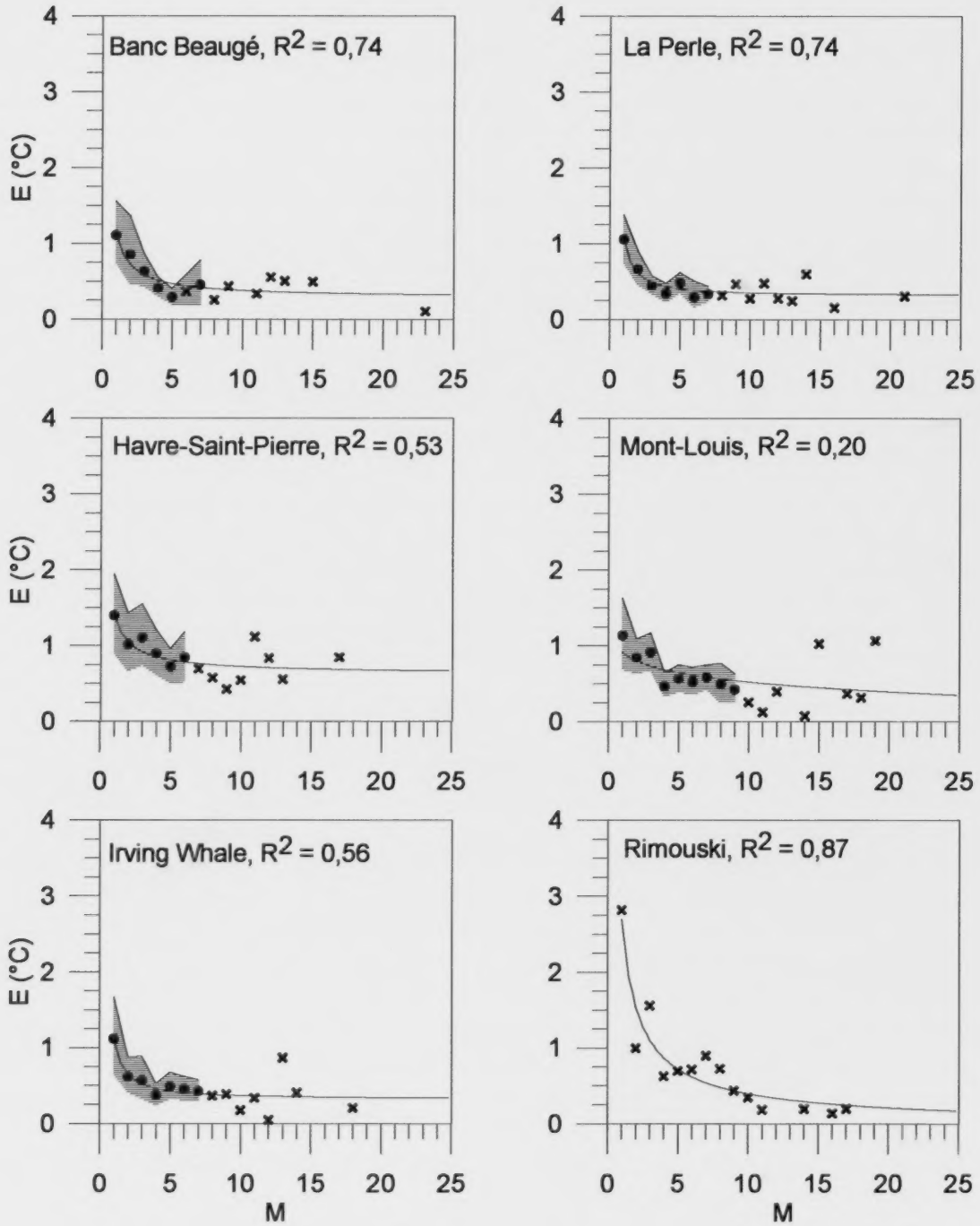

Figure 5. L'erreur absolue des moyennes hebdomadaires en fonction de la classe de pixel M. La régression non-linéaire est représentée par la ligne continue tandis que la surface ombragée est l'intervalle de confiance à 95 % obtenu par la méthode des percentiles bootstrap (× si N < 10 ; • autrement). R^2 désigne le coefficient de détermination.

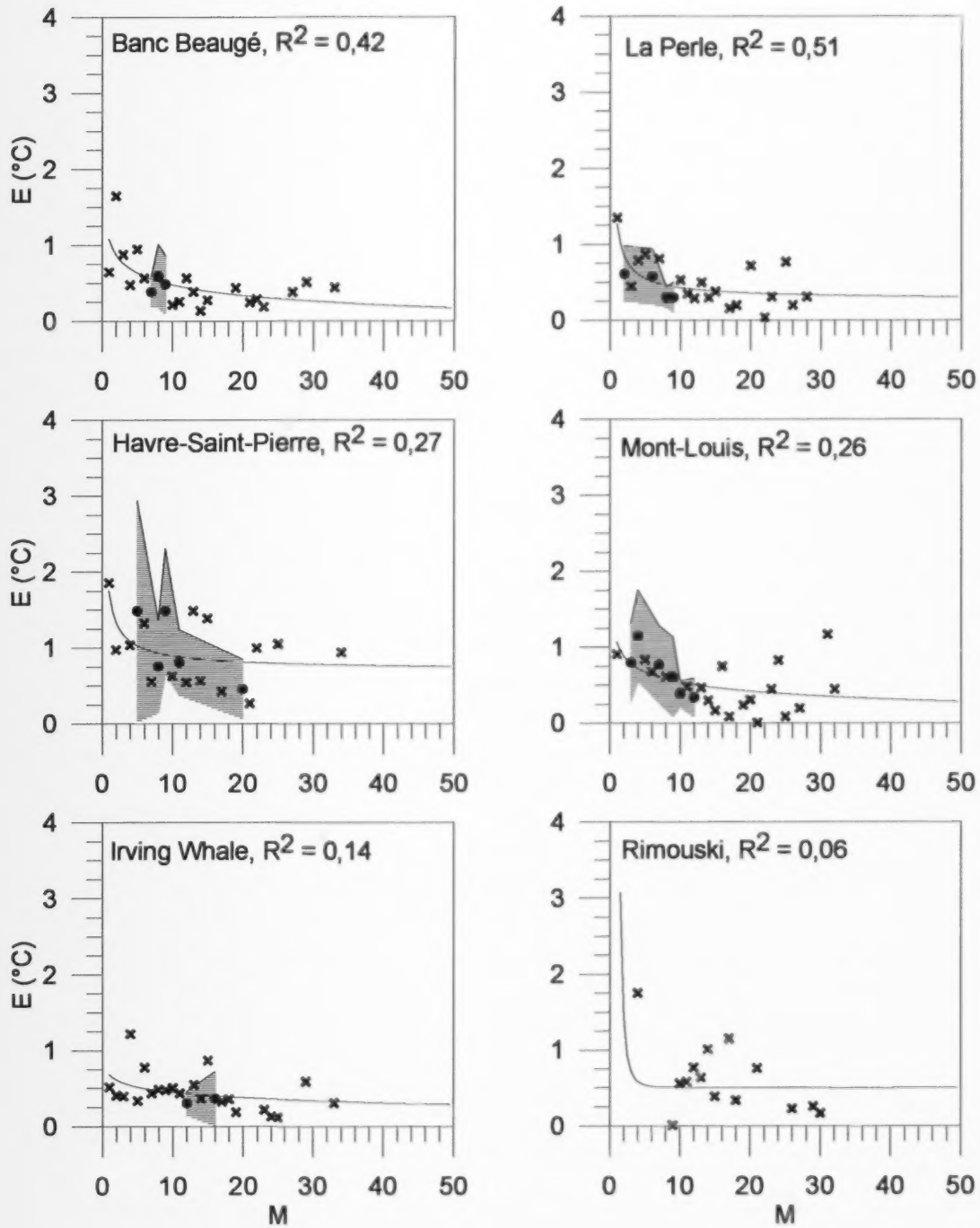

Figure 6. L'erreur absolue des moyennes bimensuelles en fonction de la classe de pixels M. La régression non-linéaire est représentée par la ligne continue tandis que la surface ombragée est l'intervalle de confiance à 95% obtenu via une distribution de Student (× si limite inférieure IC < 0, N < 3, |asymétrie| > 1 ; ● autrement). R^2 désigne le coefficient de détermination.

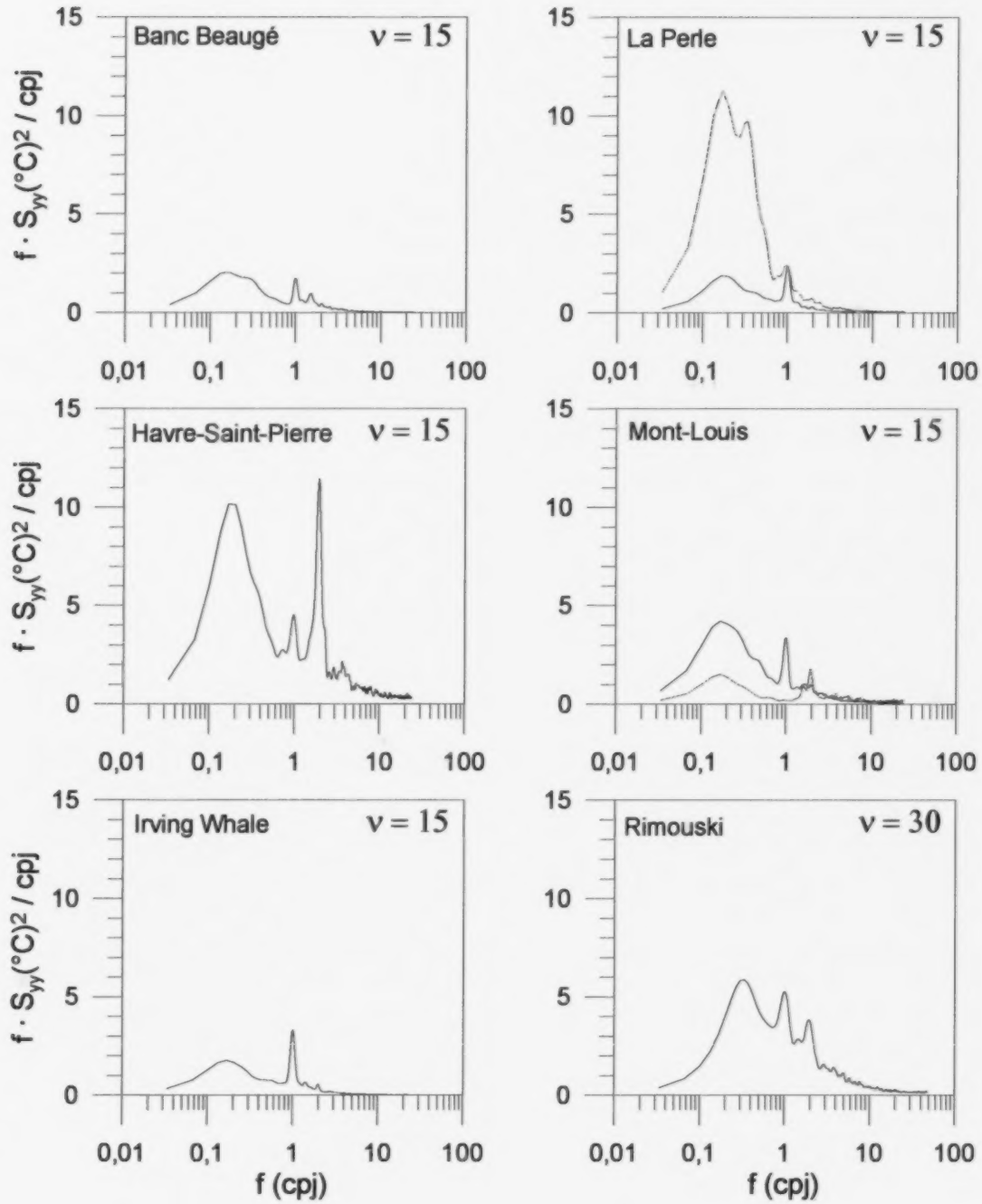

Figure 7. Représentation de la densité spectrale de puissance préservant la variance, f·Syy $(°C)^2$ /cpj (cycle par jour) en fonction de la fréquence f (cpj). Chaque courbe représente le spectre moyen des températures *in situ* pour les années 2002-2004. Aux stations La Perle et du Mont-Louis la ligne rouge représente le spectre moyen (années 2002-2003 pour La Perle et 2002-2004 pour Mont-Louis) des températures mesurées à 26 m et 30 m de profond respectivement ; ν représente le nombre de degrés de liberté équivalent.